



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE, AEROSPAZIALE, DEI MATERIALI

Dottorato in Ingegneria Civile ed Ambientale - Indirizzo Ingegneria Idraulica ed Ambientale

EFFETTI IDRO-MORFODINAMICI DI UNA BARRIERA SOFFOLTA IN GEOTESSUTO

Settore scientifico disciplinare ICAR/01

TESI DI
PIAGIO CAMMAROTO

COORDINATORE DEL DOTTORATO
CHIAR.MO PROF. ORAZIO GIUFFRÈ

TUTOR
CHIAR.MO PROF. GIOVANNI B. FERRERI

CO-TUTOR
CHIAR.MA PROF.SSA CARLA FARACI

XXVI CICLO - ANNO ACCADEMICO 2015-16

DOTTORATO



INDICE

Capitolo I

Introduzione

<i>1.1 Generalità</i>	<i>Pag. 4</i>
<i>1.2 Posizione del problema</i>	<i>Pag. 4</i>
<i>1.3 Obiettivi</i>	<i>Pag. 8</i>
<i>1.4 Metodologia e fasi del lavoro svolto</i>	<i>Pag. 9</i>

Capitolo II

Erosione costiera ed interventi di protezione

<i>2.1 Generalità</i>	<i>Pag. 12</i>
<i>2.2 Tipologia di interventi per la difesa costiera</i>	<i>Pag. 13</i>
<i>2.3.1 Barriere distaccate emergenti</i>	<i>Pag. 18</i>
<i>2.3.2 Barriere distaccate soffolte</i>	<i>Pag. 19</i>
<i>2.3.3 Opere perpendicolari alla costa</i>	<i>Pag. 20</i>
<i>2.3.4 Opere aderenti</i>	<i>Pag. 20</i>
<i>2.4 Opere morbide</i>	<i>Pag. 20</i>
<i>2.4.1 Ripascimenti</i>	<i>Pag. 21</i>
<i>2.5 Soluzioni innovative</i>	<i>Pag. 21</i>
<i>2.5.1 Acquareef</i>	<i>Pag. 22</i>
<i>2.5.2 Reef ball</i>	<i>Pag. 23</i>
<i>2.5.3 Pep reef</i>	<i>Pag. 24</i>
<i>2.5.4. Le barriere soffolte su pali in Italia</i>	<i>Pag. 26</i>
<i>2.5.5 Tecnoreef</i>	<i>Pag. 28</i>
<i>2.5.6 Barriere in geotessuto</i>	<i>Pag. 29</i>

Capitolo III

Modelli fisici

<i>3.1 Generalità</i>	<i>Pag. 36</i>
<i>3.2 Analisi dimensionale e teorema di Buckingham</i>	<i>Pag. 37</i>
<i>3.3 Criteri di similitudine</i>	<i>Pag. 38</i>

<i>3.4 Modelli fisici</i>	<i>Pag. 40</i>
<i>3.4.1 Modelli fisici a fondo fisso</i>	<i>Pag. 41</i>
<i>3.4.2 Generazione delle onde in laboratorio</i>	<i>Pag. 45</i>

Capitolo IV

Metodo per la stima del coefficiente di riflessione in laboratorio

<i>4.1 Generalità</i>	<i>Pag. 50</i>
<i>4.1 Stima del coefficiente di riflessione</i>	<i>Pag. 51</i>

Capitolo V

Descrizione dell'apparato sperimentale

<i>5.1 Generalità</i>	<i>Pag. 57</i>
<i>5.2 Descrizione dell'apparato sperimentale</i>	<i>Pag. 57</i>
<i>5.3 Strumentazione utilizzata</i>	<i>Pag. 58</i>
<i>5.4 Preparazione modello fisico</i>	<i>Pag. 59</i>
<i>5.5 Operazioni preliminari</i>	<i>Pag. 62</i>
<i>5.5.1 Problematiche riscontrate</i>	<i>Pag. 62</i>

Capitolo VI

Esperimenti condotti ed analisi risultati

<i>6.1 Generalità</i>	<i>Pag. 65</i>
<i>6.2 Procedura sperimentale adottata</i>	<i>Pag. 65</i>
<i>6.2.1 Operazioni preliminari</i>	<i>Pag. 65</i>
<i>6.2.2 Acquisizione dei dati</i>	<i>Pag. 66</i>
<i>6.3 Elaborazione ed analisi dei risultati</i>	<i>Pag. 67</i>
<i>6.3.1 Prove condotte</i>	<i>Pag. 67</i>
<i>6.4 Analisi dei risultati</i>	<i>Pag. 73</i>

Capitolo VII

Conclusioni

<i>7.1 Conclusioni</i>	<i>Pag. 87</i>
<i>Ringraziamenti</i>	<i>Pag. 88</i>
<i>Bibliografia</i>	<i>Pag. 89</i>

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 Generalità

Negli ultimi quindici anni la progettazione delle opere di difesa costiera ha posto la sua attenzione sulla ricerca di nuove tipologie di barriere che soddisfino tre requisiti: ottime caratteristiche prestazionali, economicità e basso impatto ambientale. In letteratura si trovano numerosi lavori riguardanti lo studio delle barriere frangiflutti sia tradizionali sia innovative. Ciononostante, diversi sono gli aspetti ancora da analizzare. L'ingegneria costiera per le caratteristiche di unicità dell'ambiente in cui opera è fonte di continue riflessioni ingegneristiche e permette ambiti di ricerca sempre nuovi ed affascinanti. Basti pensare che difficilmente si riesce a standardizzare una procedura o una tipologia di intervento per la stessa problematica, in quanto la dinamicità dell'ambiente marino e la complessità di rappresentare in formule matematiche, di costruire modelli di laboratorio affidabili e realistici, rendono il campo di ricerca in continua evoluzione. Il laboratorio per eccellenza dell'ingegneria marittima infatti è il mare, la possibilità di studiare i fenomeni in scala naturale è affascinante ma se non ad eccezione dei principali centri di ricerca internazionali resta una suggestione. L'unicità di ogni unità fisiografica, fra l'altro, richiede un progetto ad hoc quasi per ogni opera di ingegneria costiera.

Partendo da queste considerazioni nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata sulle opere di protezione dall'erosione costiera, con particolare riferimento alle barriere frangiflutti soffolte.

1.2 Posizione del problema

I cambiamenti atmosferici, la continua antropizzazione delle coste, rappresentano le principali cause che hanno determinato negli anni il sensibile aumento dei tratti di costa soggetti a fenomeni di erosione costiera. Le coste in particolare per il territorio italiano rappresentano una risorsa naturale ed economica fondamentale. L'area costiera è un sistema dinamico complesso in continua evoluzione. Il delicato equilibrio delle unità idrografiche, negli ultimi decenni, è stato più volte compromesso dall'operato dell'uomo, sia direttamente, cementificando

chilometri di linea di costa, sia indirettamente, adottando scelte progettuali discutibili che hanno interessato l'alveo di fiumi e torrenti, riducendo l'apporto solito dalle montagne al mare. In Italia si alternano due principali tipi morfologici costieri naturali (Atlante delle opere di sistemazione costiera, 2007):

- coste alte e rocciose, per circa il 34% del totale;
- coste basse e sabbiose, per circa il 58%;
- il restante 8% è costituito da foci e coste banchinate.

La spiaggia è un deposito costiero litorale costituito da sedimenti (sabbie e/o ciottoli), che si estende dalle dune costiere o affioramenti rocciosi e lato off-shore fino ad una profondità tale da non avere più interazione tra i depositi sabbiosi sul fondo ed il moto ondoso.

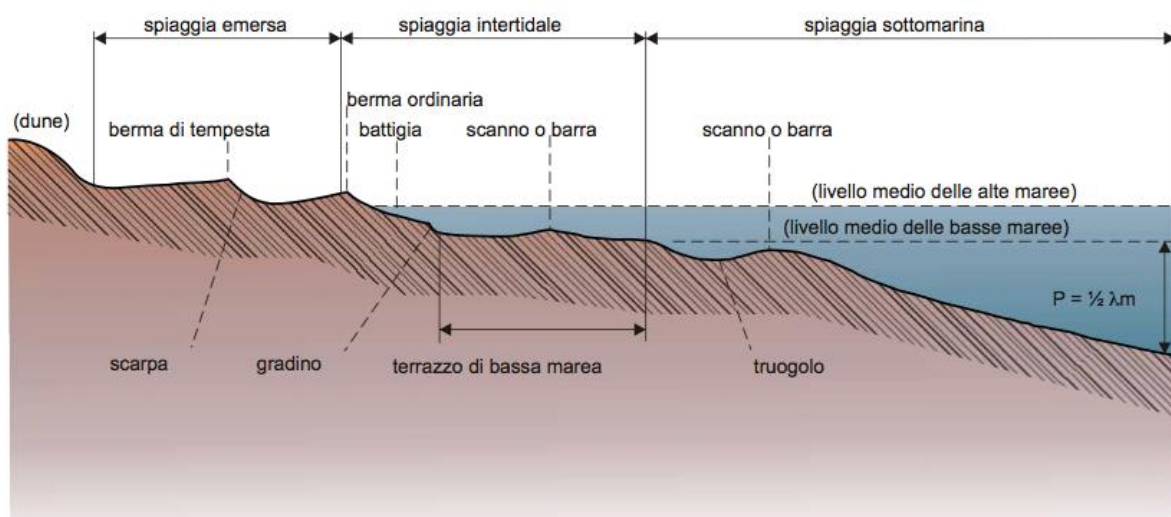


Figura 1 Profilo di una spiaggia e principali elementi caratteristici(fonte: Atlante delle opere di sistemazione costiera)

Le opere più diffuse per contrastare l'erosione costiera sono le barriere frangiflutto. In generale, le barriere frangiflutto servono a:

- determinare il frangimento delle onde, proteggendo la costa dall'attacco diretto del moto ondoso. L'energia viene in parte riflessa verso il largo ed in parte dissipata per interazione con la struttura stessa, per cui l'onda trasmessa nello specchio d'acqua protetto e il suo potere erosivo risulta di fatto molto indebolita;
- causare una variazione del trasporto solido determinando la sedimentazione di

materiale al loro tergo. Il materiale trasportato dalle onde incidenti, rimane intrappolato e si accumula nella parte retrostante la struttura.

Si parla di *frangiflutto emerso* se la quota della cresta di barriera è superiore al livello medio del mare. Esso potrà essere raramente o frequentemente tracimabile, a seconda delle condizioni di mare che si verificano. Le scogliere di tipo “tradizionale” sono alte, e vengono tracimate solo dalle onde più grandi, sono caratterizzate dalla presenza di un nucleo poco permeabile, per cui le onde trasmesse oltre le stesse raggiungono complessivamente valori modesti, quantificabili con buona approssimazione tramite collaudate espressioni proposte in letteratura (e.g. Van der Meer e Janssen, 1995). I frangiflutti non tracimabili hanno trovato largo impiego nella difesa portuale: si parla in questo caso frangiflutti portuali o dighe frangiflutti, per la quale si rende necessaria una protezione anche dagli stati di mare più violenti.

In figura 2 si riporta un esempio del litorale in provincia di Messina, su cui i frangiflutti emersi hanno trovato in passato applicazione. In questo caso, le opere rappresentano quasi una diga al moto ondoso, una protezione quasi totale, tuttavia generano al contempo anche una forte riflessione dell’onda incidente con causa, a volte, di un profondo scavo al piede dell’opera che ne mette in pericolo la stabilità stessa. Questo tipo di struttura inoltre può peggiorare la qualità delle acque, facendo assumere alla zona protetta caratteristiche di zone semilagunari, esser un ostacolo per la fruizione del litorale anche da parte dei natanti e generare pericoli per la balneazione stessa, oltre che infine alterare il paesaggio locale.

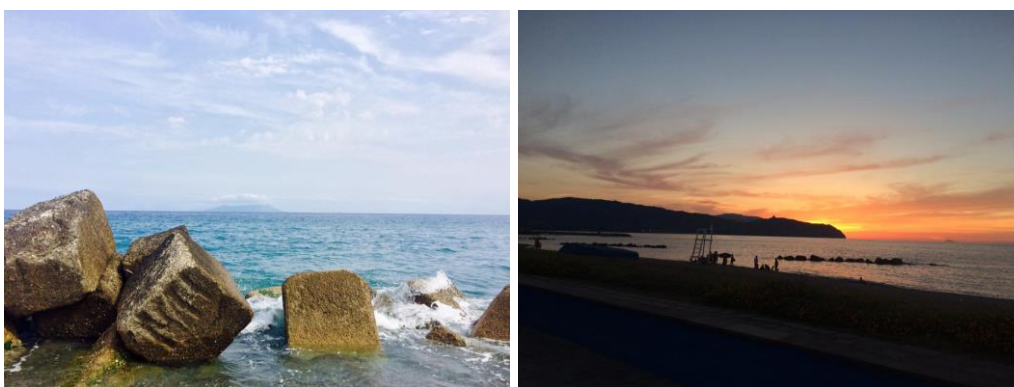


Figura 2 Barriere frangiflutti tradizionali (Litorale messinese)

Negli ultimi anni abbiamo assistito ad una progressiva sostituzione di questa tipologia di opere

con scogliere con modeste quote di coronamento, note come *Low Crested Breakwaters* nella letteratura anglosassone. Tali strutture, facilmente tracimabili in caso di mareggiate, hanno il vantaggio di avere un impatto ambientale minore dal punto di vista visivo. Tra due o più barriere si rende necessario l'impiego di varchi, per assicurare il dovuto ricambio idrico della zona protetta evitandone la rapida eutrofizzazione e garantire l'accessibilità nautica alla costa. Infine se la quota della cresta è inferiore al livello medio del mare, l'opera è definita *barriera sommersa* (Fig. 3); si ha il vantaggio di un minore inquinamento dello specchio d'acqua retrostante, dal momento che il ricircolo idrico è sempre garantito, e di migliorare l'aspetto della spiaggia visto che l'opera rimane "invisibile" sotto il pelo libero dell'acqua e si vede solo l'onda frangersi su di essa, simulando l'effetto tipico della barriera corallina. L'aspetto negativo nel caso in cui venissero progettate o messe in opera male è dovuto all'incremento della trasmissione del moto ondoso. Qualora la profondità della loro sommergenza sia superiore al metro, esse potrebbero, in linea di principio, essere realizzate anche per lunghi tratti in modo continuo cioè senza prevedere varchi. Il coefficiente di trasmissione di queste opere, e quindi la loro efficacia di protezione della costa dal moto ondoso incidente, risulta inversamente proporzionale alla quota di sommergenza. Solitamente la cresta viene posta di poco al di sotto del livello medio marino (opere a debole sommergenza), risultando indispensabile l'impiego di varchi.

L'utilizzo di Low Crested Structures e barriere sommerse da una parte coniuga la protezione della linea di costa con la riduzione dell'impatto ambientale, dall'altro può causare problemi di erosione in quanto, se mal messe in opera o peggio mal progettate, esse possono causare la modifica della circolazione idrodinamica tra le strutture e la linea di riva.

L'innalzamento del livello del mare e l'accresciuta sensibilità nei confronti delle coste intese anche come possibile risorsa economica in termini di turismo balneare ha determinato sempre più la necessità di conoscere approfonditamente il comportamento idraulico delle barriere sommerse ed in particolare la ricerca di nuovi materiali per realizzarle. Questo ha acceso un focus dell'ingegneria costiera riguardante l'indagine sperimentale su frangiflutti tracimabili e barriere sommerse. Più in particolare in letteratura si sono studiati i principali fenomeni di interazione fra Low crested Structures e moto ondoso: trasmissione e riflessione ondosa; modifiche degli spettri di potenza energetica nella zona d'ombra delle opere di protezione; fenomeni di run-up e di overtopping. Sebbene la tracimazione d'onda oltre la struttura sia stata

studiata negli anni, l'attenzione è stata rivolta soprattutto verso le strutture con nucleo impermeabile (come dighe costiere per la protezione dalle inondazioni) uno dei contributi più importante e recente è stato il cosiddetto manuale dell'Overtopping. Queste riflessioni hanno indotto ad indirizzare la ricerca di dottorato verso questo tipo di analisi e di rivolgere lo studio verso barriere sommerse ma realizzate con un materiale a scarso impatto ambientale, economico e pratico come il geotessuto.

1.3 Obiettivi

L'obiettivo di questa campagna sperimentale è di analizzare il comportamento delle barriere sommerse in geotessuto. La barriera in geotessuto è un'opera innovativa che riesce a coniugare economicità e basso impatto ambientale. Nel periodo di dottorato si è valutato se queste barriere possono rappresentare delle valide alternative in termini idromorfodinamici alle barriere tradizionali per la protezione delle spiagge interessate da fenomeni di erosione costiera. La barriera è costituita da sacchi di geotessuto riempiti con sabbia prelevata in zone limitrofe all'area di intervento, preferibilmente cave marine presenti a largo.

Le indagini sperimentali sono state condotte in scala in una canaletta marittima di laboratorio con fondo mobile sabbioso, considerando una disposizione dei sacchi ordinata (cioè disposti tutti longitudinalmente al canale e accuratamente assestati) ed una alla rinfusa; per la disposizione ordinata sono state considerate diverse granulometrie della sabbia di riempimento. Le prove sono state eseguite per diversi stati di mare. Per ciascuna prova (relativa a una combinazione di disposizione, granulometria e stato di mare), sono stati investigati: 1) l'idrodinamica prodotta dall'interferenza della barriera con il moto ondoso; 2) la stabilità dell'opera; 3) la morfodinamica del fondo a monte della barriera (lato off-shore). Sono stati inoltre determinati i coefficienti di riflessione e di trasmissione, utili per valutare l'efficacia dell'opera ai fini della protezione delle coste, e sono state riconosciute le zone di escavazione e di deposito a monte e a valle della barriera, studiando anche l'evoluzione spazio-temporale della morfodinamica del fondo con prove lunghe fino a 12h, corrispondenti a circa 85 h a scala di prototipo.

1.4 Metodologia e fasi del lavoro svolto

Durante il periodo di ricerca è stata svolta un'indagine sperimentale in laboratorio. L'attività si è articolata principalmente in attività di ricerca e di modellazione fisica con lo scopo di analizzare e mettere in pratica le conoscenze di ingegneria idraulica marittima e costiera che in particolare nel primo anno ed in soprattutto durante il periodo trascorso all'estero sono state acquisite e perfezionate.

Il tema proposto ad inizio dottorato aveva l'obiettivo di simulare, attraverso una modellazione fisica in scala di laboratorio, l'impatto del moto ondoso su diverse tipologie di strutture costiere tradizionali e di nuova generazione. Il progetto si proponeva quindi di determinare le azioni idrodinamiche esercitate dall'azione dell'onda sulla struttura, individuare gli effetti sulla struttura di run-up, overtopping, riflessione, trasmissione, etc, studiare e determinare i criteri di stabilità dei singoli elementi a protezione delle sponde, del piede, o della sommità, ottimizzare la tipologia di struttura da adottare, sviluppare dei criteri di intervento per rinforzare o riparare danni su strutture esistenti, valutare gli effetti sulla stabilità ed il comportamento della struttura. In realtà durante lo svolgimento dell'attività di ricerca l'interesse è stato focalizzato sulle barriere in geotessuto per cui si è indirizzata la tesi principalmente all'analisi di una barriera soffolta in geotessuto della quale si sono investigati gli aspetti che verranno descritti in seguito.

Le attività formative, sono state concordate con il tutor, Prof. Giovanni Ferreri e con il co-tutor, Ing. Carla Faraci, ed hanno avuto come obiettivo principale l'approfondimento degli argomenti necessari al raggiungimento degli obiettivi di ricerca previsti dal progetto, mediante:

- Attività di formazione
- Attività di ricerca

In questo contesto si è scelto di svolgere un periodo di ricerca all'estero presso l' UCL - University College London, fondata nel 1826, UCL è oggi una delle più importanti università europee. Grazie al bando indetto dall'Università di Palermo: *“Contributi per periodi di formazione all'estero ad iscritti senza borsa ai corsi di dottorato di ricerca dell'Università degli studi di Palermo.”* L'esperienza presso l'università di Londra (UCL) è iniziata il 22 Settembre 2014 e si è conclusa il 22 Dicembre 2014.

Durante il periodo di studio a Londra, è stato affiancato dal Prof. David Alexander che svolge la sua attività presso l'Institute for Risk and Disaster Reduction, Alexander ha indirizzato Cammaroto presso il Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering dove sono

state affrontate le problematiche di erosione costiera. Il Prof. Richard Simons è stato il suo tutor didattico. Inoltre ha coadiuvato il professore Simons ed il suo collaboratore Dott. Dimitris Stagonas nello studio in laboratorio di particolari gruppi di onde detti "Focus waves".

Queste particolari onde sono spesso usate in modelli fisici e modellazioni numeriche come rappresentazione di onde estreme o come strumento per generare onde molto ripide e frangenti in una determinata posizione nello spazio e nel tempo. Teoricamente una "focus wave" si ottiene quando tutti i componenti di un gruppo di onde raggiungono la stessa fase. Un vantaggio dell'utilizzo di questo tipo di onde è rappresentato dal fatto che l'onda ottenuta è significativamente più alta e più ripida rispetto a qualsiasi altra all'interno di un gruppo di onde, e come detto, si verifica in un punto predefinito nello spazio e nel tempo. Di conseguenza una "focus wave" rappresenta un evento con un grande periodo di ritorno che altrimenti richiederebbe molto tempo per esser riprodotto in una sequenza casuale in laboratorio. Per questo motivo è spesso utilizzata nelle indagini sperimentali su strutture marine, in modo tale da rappresentare la possibilità dell'impatto di un'onda improvvisa su una struttura in mare aperto che altrimenti richiederebbe tempi di sperimentazione in laboratorio molto lunghi.

L'attività svolta negli anni di ricerca ha avuto l'obiettivo di simulare e analizzare gli effetti del moto ondoso una barriera soffolta in geotessuto a protezione di un litorale, i risultati ottenuti sono stati presentati nell'articolo "*Experimental investigation on a geocontainer submerged reef*" presentato al convegno internazionale di Varna Coastlab14.

I sacchi in geotessuto hanno trovato un largo impiego, in particolare negli ultimi 20 anni, nella protezione dei litorali diventando una delle principali alternative alle strutture costiere più tradizionali, questo principalmente per la loro versatilità e i costi più contenuti.

CAPITOLO 2

EROSIONE COSTIERA ED INTERVENTI DI PROTEZIONE

2.1 Generalità

Il sistema mare-costa rappresenta un sistema dinamico in costante evoluzione, di difficile modellazione numerica a causa dei numerosi fenomeni fisici presenti. L'erosione costiera, ovvero l'avanzamento del mare a discapito della linea di costa è uno dei fenomeni più importanti per le conseguenze ambientali che determina ed oggi acquista sempre più rilevanza anche dal punto di vista economico, in quanto sempre più spesso ha conseguenze dirette su attività commerciali, infrastrutture e turismo.

Dal 1950 al 1999, in Italia, il 46% delle coste basse ha subito modifiche superiori a 25 metri e, pur avendo considerato in progradazione quelle aree che con opere di colmamento sono state sottratte al mare e nel corso degli anni parzialmente rinaturalizzate, i tratti di costa in erosione (1.170 km) sono stati superiori a quelli in avanzamento. L'analisi delle variazioni dell'assetto della linea di riva nel periodo compreso tra il 2000 e il 2007 ha confermato tale tendenza: il 37% dei litorali ha subito variazioni superiori a 10 metri e i tratti di costa in erosione (897 km) sono ancora superiori a quelli in avanzamento (851 km). (ISPRA mare e ambiente costiero 2011) Un'ulteriore ricerca interessante è stata redatta da Nomisma (2005) sul valore delle aree costiere e sulle potenzialità economiche delle spiagge italiane. Secondo questo studio, si considera che il turismo è destinato in Europa a diventare l'attività economica principale entro la fine del secolo, con la sua capacità di generare il 17 per cento di posti di lavoro in più rispetto al comparto industriale. Lo studio dell'osservatorio e di Nomisma porta a sostenere che le coste italiane possono costituire uno dei fattori di sviluppo economico più influenti dell'economia nazionale.

La ricerca di Nomisma evidenzia infatti come il denaro che quotidianamente un turista corrisponde per soggiornare in spiaggia alimenti tutta una serie di attività economiche, sia in maniera diretta che in forma indiretta.

Le spese dei turisti rappresentano delle entrate per i settori più legati al turismo, i quali però necessitano di altri beni e servizi prodotti da altri comparti, attivando così in maniera indiretta anche ulteriori attività economiche.

Un solo dato sul valore economico rappresentato dalla voce spiaggia: ipotizzando di ricostruirne una mediante un ripascimento che crei una nuova superficie di 100.000 metri quadrati, si calcola che in un anno ciò generi un valore - per le sole attività di spiaggia - di tre milioni di euro, mentre se si considera l'indotto economico generale dell'area costiera interessata, allora il valore economico annuo generato può arrivare a 100 milioni di euro.

2.2 Tipologie di interventi per la difesa costiera

Per la salvaguardia della linea di costa oggi, si utilizzano diversi sistemi, da quelli tradizionali ad interventi più innovativi che fanno uso di materiali nuovi o che sfruttano sistemi di generazione di energia, unendo nello stesso tempo un ruolo di protezione attiva della costa. Prima di illustrare le tipologie di intervento per la difesa dei litorali, è opportuno ricordare come qualsiasi opera realizzata lungo la costa costituisca un ostacolo al libero propagarsi del moto ondoso, e pertanto essa può indurre alterazioni della costa in zone limitrofe a quella di intervento. Da tali semplici considerazioni appare evidente che è necessario pensare gli interventi non come singole opere ma come parte integrante di un sistema di difesa che consenta di assicurare l'integrità dell'intera fascia litoranea.

A rendere ulteriormente complessa la scelta del tipo di opera da impiegare per la difesa dei tratti di costa in erosione contribuisce anche la necessità di tenere in conto gli effetti dei cambiamenti climatici, quali quelli legati all'innalzamento del livello medio marino.

E' possibile identificare due grandi classi di interventi, suddivisi in base alla tipologia della struttura realizzata: opere di tipo morbido (soft), opere di tipo rigido (hard).

2.3 Opere rigide

Gli interventi di tipo rigido sono i più utilizzati; tra questi possono annoverarsi: opere parallele alla linea di riva (longitudinali) e da questa distanziate; opere perpendicolari alla costa (pennelli); opere parallele ed aderenti alla riva (radenti); sistemi di difesa a T; muri di protezione; combinazioni dei tipi precedenti.

Gli interventi di tipo rigido hanno trovato ampia diffusione in quanto utilizzati per intervenire in maniera localizzata, arginando il fenomeno erosivo puntualmente nei litorali laddove esso si

presenta e durando nel tempo. Spesso essi generano l'avanzamento della linea di riva, favorito dal deposito di sedimenti lungo il litorale in corrispondenza del quale sono collocate, con ovvie ricadute negative nei tratti di litorale limitrofi non direttamente interessati dall'intervento e addirittura sull'intera unità fisiografica. I frangiflutti tradizionali sono realizzati con scogli di cava o massi artificiali gettati in cumulo sui fondali mediamente bassi oppure presentano un nucleo centrale poco permeabile di cava e strati di massi di dimensioni crescenti verso l'esterno. Fra nucleo e rivestimento esterno (mantellata) sono interposti uno o più strati filtro di materiale di pezzatura intermedia. Il loro scopo è di impedire l'asportazione del materiale costituente il nucleo per effetto dei flussi ciclici causati dall'azione del moto ondoso.

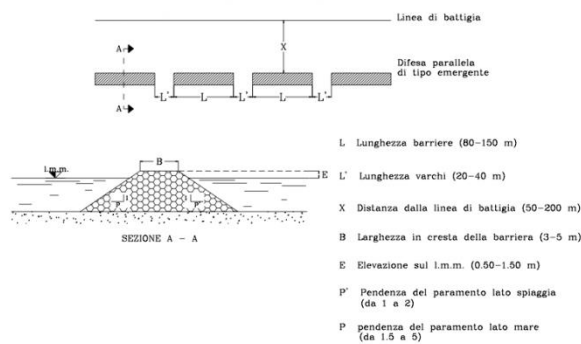


Figura 3 sezioni tipiche di una barriera frangiflutti emersa

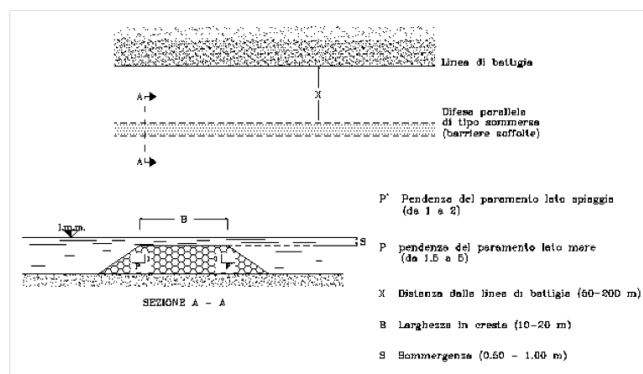


Figura 4 Sezione tipica di una barriera frangiflutti sommersa

Le vecchie tipologie solitamente erano realizzate con mantellata di massi naturali (scogliere) e di massi artificiali di calcestruzzo, oggi come vedremo si tende ad usare materiali e forme innovative. In passato si utilizzavano massi cubici o parallelepipedi, successivamente si è optato per massi di forma articolata (tetrapodo, dolos) questo migliora l'incastro e la capacità di assorbimento d'energia per rugosità e permeabilità, riducendo i fenomeni di riflessione e di sormonto (Fig.5). Si sono verificati anche clamorosi crolli causati dalla fragilità dei singoli

elementi più snelli (specie il dolos), ed oggi sono stati sostituiti da forme più massicce quali i cubi Antifer e gli accropodi ovvero la forma recente più efficiente denominata CORELOC.

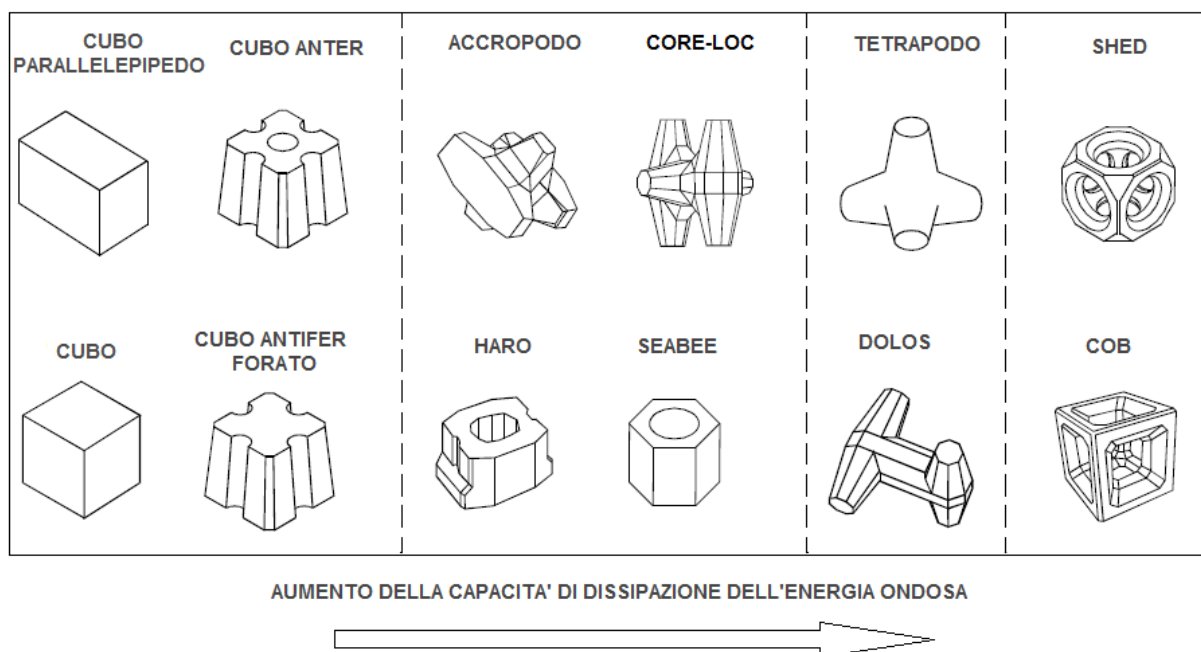


Figura 5 Forme speciali di massi frangiflutti in calcestruzzo.

I fenomeni idrodinamici costieri, generati da una barriera emersa (frangiflutti non tracimabili), sono caratterizzati dal fatto che la linea di frangimento in corrispondenza dei varchi è collocata verso il largo rispetto a quella che si localizza nella zona protetta dall'opera (Fig.6). Le onde determinano all'interno della surf zone un aumento medio del livello marino che è direttamente proporzionale all'altezza delle onde di frangimento. Tra l'opera e la costa si instaura uno squilibrio di livelli in cui i valori massimi si trovano in corrispondenza dei varchi e valori minimi sono localizzati nelle zone protette dalle opere. Questo squilibrio origina un moto interno che facilita il deposito delle materiale in sospensione.

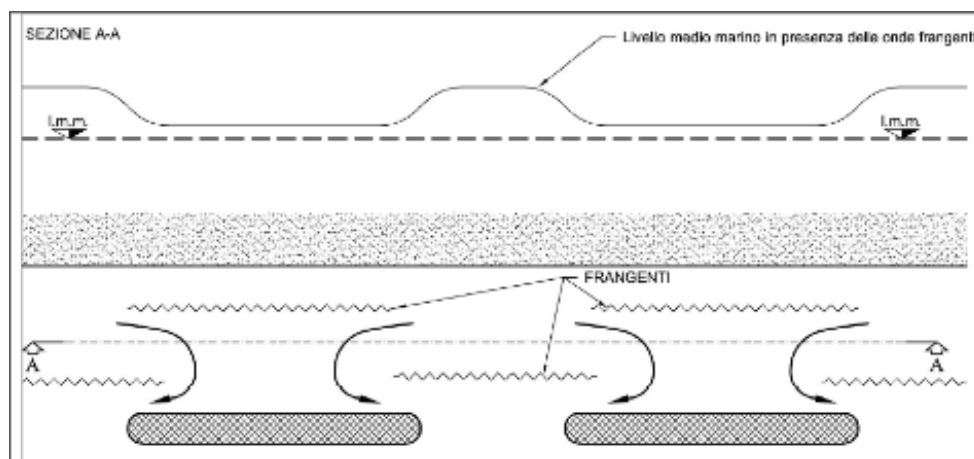


Figura 6 Schema illustrativo delle correnti indotte dal moto ondoso frangente sul un tratto di costa protetto da opere distaccate emergenti.

La diffrazione causata dalla presenza dei frangiflutti determina una conformazione della linea di costa non lineare, anzi esattamente convessa dietro alle barriere e con problemi di erosione in prossimità dei varchi (Fig. 7). Nel caso estremo si può raggiungere la formazione dei cosiddetti “tomboli” ovvero quando la linea di costa dietro il frangiflutto raggiunge la barriera. Tale aspetto può esser causa di un ristagno eccessivo di acqua e può far assumere un aspetto semi lagunare. La formazione del tombolo dipende dal rapporto d/l , con d = tirante idrico e l = lunghezza della barriera.

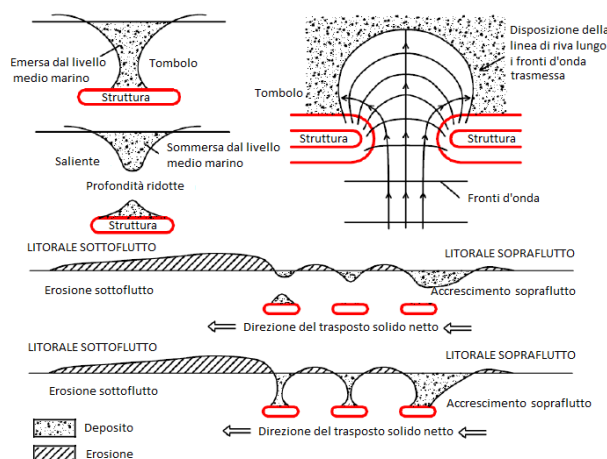


Figura 7 Meccanismi di formazione di tomboli a tergo di frangiflutti emersi.

L'idrodinamica è profondamente diversa nel caso di barriere sommerse, quali quelle oggetto di questa tesi, in quanto l'onda trasmessa alla spiaggia sarà superiore al caso precedente determinando un moto differente come mostrato in figura 8.

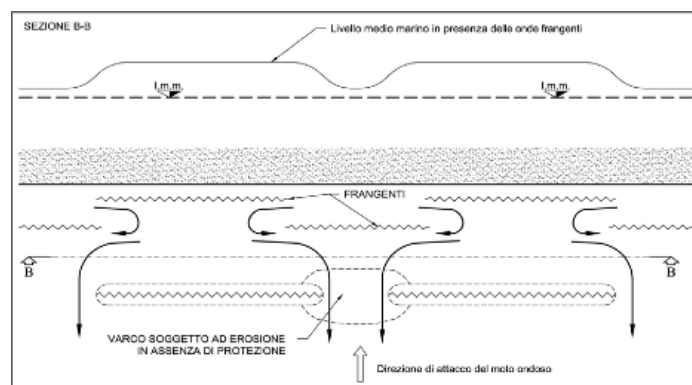


Figura 8 Schema illustrativo delle correnti indotte dal moto ondoso frangente su un tratto di costa protetto da opere distaccate emergenti o sommerse.

Si avrà quindi un innalzamento del livello medio del mare tra la barriera e la riva, che si opporrà alla portata in entrata dai varchi causandone il ritorno verso il largo. Il processo determina trasporto di massa e quindi di energia verso il largo: tra i varchi si avranno forti correnti di ritorno denominate di “rip” (letteralmente di “strappo”) che comportano il trasporto di parte del materiale all’esterno del sistema di difesa.

Queste correnti sono la causa della formazione tra i varchi di veri e propri canali; una possibile soluzione è quella di costruire delle berne in pietrame a protezione dei varchi. Le rip possono essere anche un pericolo per la balneazione, anche perché i bagnanti hanno minore percezione del pericolo in quanto osservano un’onda incidente minore.

Si riportano in figura 9 i principali parametri geometrici che caratterizzano le barriere parallele (o distaccate) a bassa cresta e a debole sommergenza.

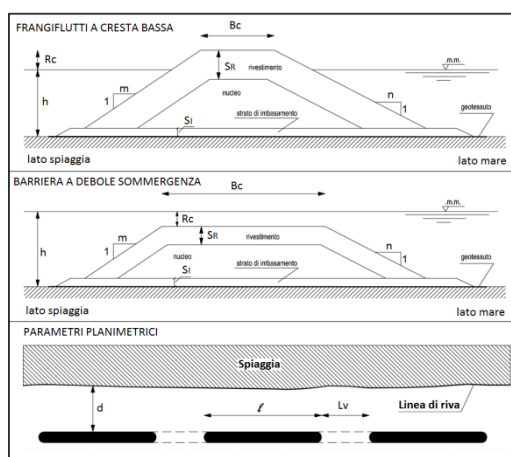


Figura 9 Principali parametri geometrici che caratterizzano le barriere a bassa cresta o a debole sommergenza.

Gli interventi manutentivi necessari possono essere tutt'altro che trascurabili ed economici. La progettazione delle opere di tipo rigido richiede particolare attenzione per garantire un lieve impatto ambientale ed una buona fruibilità della spiaggia; è sempre necessaria l'attività di monitoraggio tesa a individuare eventuali effetti negativi innescati dalle nuove opere ed a pianificare possibili interventi di riassetto.

La progettazione di opere di difesa costiera, oggi, è sempre più indirizzata ad una "collaborazione" tra interventi di tipo rigido ed interventi di tipo morbido, questo grazie all'acquisizione di maggiori informazioni sui dati ambientali marini (onde, maree, correnti, ecc.), sia per il progresso delle conoscenze sui processi idrodinamici costieri, sia infine per la consapevolezza di dover coniugare la protezione del litorale con la salvaguardia dell'ambiente.

2.3.1 Barriere distaccate emergenti

Una barriera frangiflutti distaccata emergente è un'opera costruita ad una certa distanza dalla battigia per proteggere un'area costiera dall'azione diretta delle onde. Può servire come struttura di difesa di una spiaggia e nello stesso tempo influire sul trasporto litoraneo. Generalmente è realizzata in scogliera di pietrame.

Queste barriere sono messe in opera in gruppi di elementi di lunghezza modesta, separati da varchi aventi lo scopo di consentire lo scambio di acque, l'ingresso dei sedimenti o il transito di piccoli natanti.

A seconda della quota a cui è posta la sommità dei frangiflutti, potranno dirsi emergenti o sommerse, anche se frangiflutti abitualmente emergenti, in condizioni di alta marea possono essere soggetti a tracimazione e, saltuariamente, essere completamente sommersi in caso di alta marea.

In relazione agli scopi sopra accennati, i varchi costituiscono una necessità per un sistema di barriere emergenti, ma al crescere del run-up e della sommergenza essi perdono la loro funzione e possono divenire dannosi per le correnti, dirette da riva verso il largo, che potrebbero generarsi al loro interno.

I frangiflutti dissipano l'energia dell'onda frangente creando a tergo di essi una zona protetta, dove tende a depositarsi il materiale trasportato lungo riva dall'azione combinata dell'onda e delle correnti. La formazione di questo accumulo (che in alcuni casi può diventare un vero e proprio tombolo realizzando la connessione tra la spiaggia e la barriera) ha l'effetto di impedire

il transito lungo riva delle correnti litoranee e rende la barriera funzionalmente simile ad un pennello.

In presenza di un forte trasporto long-shore, il deposito a tergo della barriera induce un avanzamento della riva protetta, a cui fa riscontro un'erosione comparabile sulle spiagge adiacenti.

I principali parametri progettuali per tali opere sono la quota di coronamento, la morfologia del fondale e la profondità (o, analogamente, la distanza dalla riva). Tali parametri influenzano l'attenuazione dell'onda, il run-up e la frazione del trasporto litoraneo che può essere trattenuto, la sezione e quindi il costo dell'opera.

2.3.2 Barriere distaccate soffolte

Questo tipo di barriere è molto comune, lo scopo principale è quello di ridurre l'energia del moto ondoso ad un livello tale da renderlo compatibile con l'equilibrio dinamico della linea di costa. Per raggiungere questo obiettivo, sono progettate e posizionate in modo da permettere la trasmissione di un'aliquota di energia sopra la barriera ed un'aliquota attraverso la struttura stessa in quanto porosa. Un vantaggio evidente è quello di avere un apporto dei sedimenti in sospensione nella massa d'acqua tracimante, che va ad arricchire la spiaggia che si vuole proteggere. Vengono spesso preferite per il loro minore impatto ambientale, non sono visibili e non intaccano in alcun modo il paesaggio. In caso di forti mareggiate o di zone in cui sono frequenti i fenomeni di storm surge esse perdono parte della loro efficacia ed inoltre è difficile prevedere la risposta della spiaggia, sarebbe interessante valutare la risposta del coefficiente di trasmissione al variare della sommergezza. Presentando una sezione minore rispetto ad una barriera emergente, anche i costi risultano essere più contenuti.

2.3.3 Opere perpendicolari alla costa

I pennelli sono strutture trasversali che in generale si utilizzano quando è accertata l'esistenza di un sufficiente trasporto long-shore. Tali strutture possono essere realizzate in varie forme e materiali, adottando massi naturali o artificiali, calcestruzzo, ferro o legno, e possono, inoltre, essere rigidi o deformabili. I pennelli interrompono il trasporto lungo riva assicurando al tratto da proteggere la quantità di materiale necessaria per la realizzazione di una spiaggia artificiale

ma hanno l'inconveniente di determinare nella spiaggia una drastica riduzione del trasporto solido che la alimentava "spostando" il problema erosivo in un'altra zona adiacente. L'erosione di quest'ultima, può essere limitata, prevedendo un intervento di ripascimento artificiale, opere di by-pass dei sedimenti o progettando l'opera in modo tale che la sua disposizione planimetrica permetta un apporto sufficiente di sedimenti alla spiaggia sottoflutto. Un altro inconveniente si presenta se l'attacco ondoso è prevalentemente frontale, in tal caso la deriva litoranea sarà scarsa; in tal caso un sistema di pennelli non assicura la difesa della spiaggia, anzi può risultare dannoso, facilitando l'allontanamento verso il largo dei sedimenti più fini.

2.3.4 Opere aderenti

I rivestimenti sono difese aderenti aventi la funzione di semplice protezione superficiale del profilo di riva, senza una precisa funzione statica di sostegno del terreno a tergo. Le difese realizzate in massi danno in genere luogo ad un approfondimento dei fondali al piede più limitato rispetto ai rivestimenti impermeabili, in quanto, essendo permeabili, permettono alla massa d'acqua frangente di penetrare al loro interno, dissipando una rilevante aliquota dell'energia incidente.

Queste opere possono essere considerate di tipo flessibile o elastico, nel senso che sono possibili anche sensibili spostamenti relativi dei massi che le compongono, senza che venga compromessa la loro stabilità, al contrario dei muri di sponda, rivestimenti, paratie ecc, che si comportano in maniera sostanzialmente rigida. L'affossamento creato dall'onda al piede dell'opera può essere compensato sovradimensionando la sezione trasversale o ponendo pietrame in eccesso, che possa andare a colmare lo scavo. A titolo orientativo, converrà ricordare che la prevedibile profondità dello scavo, sotto il fondo naturale, può raggiungere anche l'ordine dell'altezza della massima onda compatibile con il fondale originario.

2.4 Opere morbide

L'utilizzo di opere di tipo morbido prevede la stabilizzazione della linea di costa tramite utilizzo di soluzioni innovative come le barriere in geotessuto e/o ripascimenti artificiali, che consistono nel versamento di materiale granulare, di caratteristiche (tessiturali, cromatiche, ecc.) compatibili con quelle del materiale in loco. Il vantaggio di tali opere risiede nella possibilità

di stabilizzare la spiaggia rendendo minimo al contempo l'impatto sull'ambiente ed evitando di interferire con i naturali fenomeni di trasporto litoraneo. Di contro, i costi elevati, per ripascimenti non protetti di cui ci si attende una durata limitata nel tempo, costituiscono il principale deterrente al loro impiego.

2.4.1 Ripascimenti

Tra gli interventi attivi di tipo morbido appartengono i ripascimenti artificiali, versamenti di sabbia di opportuna granulometria estratta da cave di prestito in mare o a terra, una tecnica che si è sviluppata in particolare negli ultimi 20 anni. Si distinguono due tipi di ripascimenti: liberi e protetti (da una barriera sommersa, oppure opere trasversali o longitudinali per esempio). La granulometria deve in genere essere superiore a quella presente sulla spiaggia, in caso contrario si presenta un incremento della capacità di trasporto del moto ondoso, con necessità di interventi di manutenzione frequenti e costosi. Ciò induce a sconsigliare la sabbia prelevata al largo, che sebbene in genere più economica di quella terrestre risulta essere troppo fine e comporta problemi di impatto ambientale, in quanto il prelievo può alterare il moto ondoso causando una modifica della linea di battigia.

Gli obiettivi sono principalmente quelli di costruire o ricostruire aree fruibili per scopi turistici e ricreativi, offrire protezione dall'attacco del moto ondoso, ricostituire habitat per specie pregiate o in estinzione. Tra i vantaggi della realizzazione di un ripascimento artificiale vi sono quindi la possibilità di ampliamento della spiaggia e il conseguente incremento della sua fruibilità; la capacità di conservare e persino migliorare le caratteristiche paesaggistiche e ambientali; una migliore protezione da mareggiate anche attraverso la costruzione di spiagge sacrificali ed infine il fatto che si hanno in realtà perdite di sedimenti minori di quelle apparentemente stimabili, poiché il sedimento che abbandona l'area soggetta a riporto va a ripascere altri siti limitrofi.

Lo svantaggio principale è legato alla manutenzione del ripascimento stesso, ovvero alla necessità di ripetere ciclicamente l'intervento (peraltro a distanza temporale non facilmente determinabile).

2.5 Soluzioni innovative

A causa dei costi elevati di esecuzione e di posa in opera delle strutture tradizionali, si stanno studiando soluzioni alternative per la protezione delle spiagge, capaci al contempo di offrire il minor impatto ambientale e paesaggistico possibile. Si sta diffondendo l'utilizzo di opere non convenzionali per la difesa della costa, intendendo per non convenzionale una struttura che può essere progettata con materiali differenti da quelli tradizionali (come i geotessuti), spesso più economici perché disponibili in situ (come per le strutture tipo geocontainer che sono riempite di sabbia tipicamente prelevata dai fondali limitrofi), ovvero una struttura a basso impatto ambientale (come i reef artificiali che sono sviluppati con il solo fine di permettere lo sviluppo di flora e fauna marina e che si integrano nell'ambiente circostante perché permettono la crescita della vegetazione sulle stesse strutture) ovvero ancora una struttura che dissipa l'energia del moto ondoso con metodi alternativi, in modo da creare nuovi flussi di circolazione nelle zone nearshore ed eventualmente riuscire a limitare i processi erosivi e a facilitare la stabilizzazione della costa, creando nuovi profili di equilibrio (come gli Aquareef).

2.5.1 Acquareef

Tali opere risultano molto diffuse in Giappone e presentano larghezza di coronamento B variabili fra 20 e 60 m, sommergenze fra 0 e -2 m, profondità di imbasamento fra 2 ed 8 m e pendenze lato terra 1/2 e lato mare 1/3.

Il reef artificiale è costituito da singole unità di 6 -10ton, disposte in maniera regolare e a dente di sega in modo da dissipare l'energia del moto ondoso. La stabilità della struttura è garantita dalla pendenza del reef (1:2), che converte una parte dell'energia del moto ondoso da orizzontale a verticale. L'altezza delle unità è di 2m.

La struttura, pur con un costo di costruzione elevato, ha dato buoni risultati evidenziati anche da studi specifici sulla stabilità.

2.5.2 Reef Ball

Le unità Reef Ball sono elementi in calcestruzzo a Ph neutro, con peso variabile fra i 15kg e le 2.7t.

Le scogliere costituite da unità Reef Ball, originariamente introdotte per simulare le condizioni di habitat marino (Fig. 9) (tane per pesci e strato per la crescita di piante), presentano diversi vantaggi rispetto alle tradizionali strutture frangiflutti:

- sono di facile costruzione in situ, utilizzando uno stampo brevettato;
 - sono di posizionamento facile ed economico, mediante strutture galleggianti di supporto (non richiedono chiatte e gru);
 - possono essere progettate per specifiche condizioni di habitat marino;
- diventano una solida base per lo sviluppo dei coralli.



Figura 10 Esempi di Reef ball

La prima installazione di Reef Ball è stata fatta nel 1998 in una spiaggia nel sud della Repubblica Dominicana: sono state installate 450 unità in tre file per formare un frangiflutto sommerso per stabilizzare la linea di riva, per simulare le condizioni di habitat marino (tane per pesci e strato per la crescita di piante) e per, in ultima istanza, incentivare il turismo.

Le singole unità erano alte 1.2m, con un diametro di base di 1.5 – 2m ed un peso di 1600- 2000 kg; la profondità di installazione è stata di 1.6 – 2m, così che le unità avevano una sommergezza di 0.3 - 0.8m. Le unità sono state fabbricate in stampi e sono state fissate sul fondo con aste di Fiberglass trapanate nel fondale roccioso.

Il litorale nell'autunno del 1998 è stato investito da un uragano di terza categoria, ma nessuna unità ha subito spostamenti o danneggiamenti in quanto gli elementi erano fissati al fondale roccioso. E' da che evidenziare, in generale, che uno dei difetti più significativi dei *reef* è la ridotta stabilità a causa di escavazioni localizzate determinate dalle turbolenze generate o a causa della non tenuta del terreno di posa. Di conseguenza, in mancanza di un adeguato

ancoraggio, occorre preparare il terreno di posa con idonei materassi. Il frangiflutto con Reef Ball risulta efficace per la stabilizzazione della linea di riva, con un elevato incremento della ampiezza della spiaggia.

Le problematiche connesse all'utilizzo dei *reef* artificiali in acque basse sono legate, come detto, alla stabilità, all'escavazione ed all'assestamento delle unità stesse: le strutture sommerse devono resistere al moto ondoso, alle correnti indotte dalle onde ed all'escavazione che avviene nella *surf zone*. Nel caso di fondale roccioso, le strutture devono resistere allo scivolamento ed al rotolamento; il peso delle strutture contribuisce alla loro resistenza agli spostamenti e le unità possono essere fissate al fondo per aumentare la resistenza. Nel caso di fondale sabbioso, le unità sono soggette ad escavazione ed assestamento. Un metodo utilizzato per migliorare la stabilità e la resistenza delle strutture ai movimenti, all'escavazione e agli assestamenti può essere l'installazione di aste o pali che connettono le strutture al fondo (le aste o i pali sono inclinati rispetto al fondo per permettere alle unità di resistere ai movimenti orizzontali e all'assestamento verticale).

2.5.3 Pep reef

Il PEP Reef (*Prefabricated Erosion Prevention*) è un *reef* artificiale formato da moduli di calcestruzzo; ogni modulo presenta dimensioni approssimative pari a 2.7 x 3.6 x 2.4m e pesa circa 25 tonnellate (fig.10).



Figura 11 Pep reef

Questo tipo di struttura frangiflutto è definita “*narrow-crested*”, a cresta stretta, a causa della forma triangolare con la dimensione più stretta sulla cresta, pari a 0.3m la struttura frangiflutto si ottiene mettendo insieme i diversi moduli con la faccia meno ripida posizionata in direzione del lato di provenienza delle onde e la faccia a pendenza maggiore posizionata di fronte alla spiaggia. La cresta è stata progettata per influenzare il moto ondoso; la pendenza più ripida della faccia lato spiaggia causa un flusso di ritorno sotto le onde frangenti

che permette il trasporto verso riva della sabbia in sospensione. La sabbia viene così intrappolata sulla faccia lato spiaggia della struttura in modo da prevenire il flusso dei sedimenti in zona *offshore*.

I PEP Reef sono stati installati nel 1996 nella città di Vero Beach, Florida, USA; per valutarne l'efficacia, l'US Army Corps of Engineers condusse un programma di monitoraggio della durata di anni, che prevedeva misure del profilo della spiaggia, verifica dei cambi di volume dei sedimenti, misure di trasmissione delle onde, monitoraggio dell'assestamento dei frangiflutti e misure di escavazione. Per quanto riguarda le modifiche della linea di riva, si nota che il trend nell'intero periodo di monitoraggio mostra un avanzamento della linea di riva verso il mare e quindi un accumulo di materiale dovuto alla presenza dei PEP reef.

L'assestamento dei PEP Reef, è stato misurato per i primi due anni raschiando dalla cresta delle strutture la crescita biologica, e posizionando le aste in modo da misurare nel modo più accurato possibile l'ubicazione delle strutture. L'assestamento delle strutture e l'escavazione non sembrano essere correlate tra loro: l'assestamento è sembrato arrestarsi mentre l'escavazione è continuata durante tutto il periodo di monitoraggio. Tutte le strutture sono generalmente più basse rispetto alla loro posizione di posa in opera. Alcune strutture sembrano assestarsi semplicemente sul fondale, altre ruotando sia verso riva che verso mare. Ovviamente per diversi fondali l'assestamento è stato differente.

Per quanto concerne gli studi sull'escavazione, va evidenziato che le aste per misurare l'escavazione sono state posizionate vicino alle strutture in tutte le aree di controllo per registrare le modifiche nel deposito di materiale; tali misure hanno mostrato una grande variabilità nel tempo. Riguardo alle differenze di escavazione sulla strutture dal lato spiaggia e dal lato mare e nella zona dei gaps tra le strutture, si mette in evidenza come vi sia maggiore escavazione nella zona lato spiaggia.

L'installazione di un PEP Reef a Palm Beach, Florida è stata monitorata per tre anni. Le strutture sono state posizionate in una zona a sud del porto di Palm Beach, dove, per effetto della costruzione del canale di entrata del porto, si è verificato un forte processo erosivo della costa; in seguito ad un iniziale recupero della spiaggia mediante ripascimento, si è progettata l'installazione dei PEP Reef per prevenire futuri processi erosivi e cercare di favorire un avanzamento della spiaggia. La profondità di posa è stata di circa 3m, con strutture che presentavano le seguenti dimensioni: 1.8m in altezza, 4.6m in ampiezza e 3.7m in lunghezza. La posa in opera è terminata nel 1993 ed è iniziato il programma di monitoraggio, comprendente

rilievi topografici e idrografici del sito, misure di trasmissione delle onde, misure dell'assestamento delle unità e analisi dei processi erosivi.

La riduzione dell'energia dell'onda risultava tra il 5% e il 15%. Durante l'intero periodo monitorato, l'area tra il *reef* artificiale e la costa presenta una grossa perdita di materiale che si è trasformata in un abbassamento medio del fondale di 0.9m: misure cumulative dell'escavazione hanno mostrato un abbassamento nei paraggi delle strutture tra 0.5m e 1.05m. In seguito al monitoraggio citato, le strutture furono smantellate e sono state utilizzate per il nucleo di pennelli perpendicolari alla costa, installati in seguito, per cercare di prevenire ulteriori processi erosivi; il resto delle unità è stato spostato al largo per creare habitat marini artificiali.

In complesso, nei due impianti pilota il PEP Reef non ha dato risultati soddisfacenti, specie per quanto attiene alla stabilità dell'opera.

2.5.4 Le barriere su pali in Italia

La necessità di ricercare opere di difesa non convenzionali è stata sentita anche in Italia, specie nei territori in cui negli anni passati maggiormente si incominciavano a manifestare fenomeni erosivi significativi.

Si riportano di seguito indicazioni su prove sperimentali di laboratorio e di campo eseguite in anni in cui i fenomeni erosivi non erano diffusi come oggi.

Presso il laboratorio dell'Università di Pisa, per far fronte alla forte erosione che interessava i litorali adiacenti alla foce dell'Arno, furono effettuate prove su opere non convenzionali. Si analizzò una struttura costituita da pali collegati da lastre inclinate ed i risultati non furono incoraggianti (Ruggiero e Auterio, 1965).

Lo stesso risultato è stato riscontrato recentemente dal Laboratorio di Idraulica Marittima del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze dove si sono eseguite delle prove sperimentali per verificare l'impiego di simili strutture sul litorale di Marina di Massa (Aminti et al. 2004).

Dall'esame della letteratura specializzata, risulta che opere realizzate da composizioni diverse di lastre in calcestruzzo sostenute da pali, sebbene risultate efficaci negli studi su modello, non sono state mai realizzate a causa delle eccessive sollecitazioni indotte dal moto ondoso frangente, che obbligano a dimensionamenti ampiamente antieconomici. Opere emerse di

questo tipo non risulterebbero accettabili per il forte impatto visivo causato dai pesanti elementi in calcestruzzo.

Presso il laboratorio dell'Università di Padova, negli anni '80, sono state sperimentate difese realizzate con pali infissi disposti su due o tre file parallele a riva e collegati tramite travi orizzontali allo scopo di ridurre la permeabilità del sistema. L'opera si comporta in modo simile ad una barriera parallela in massi naturali se i pali sono vicini tra loro e le travi di collegamento rendono la struttura sostanzialmente impermeabile al moto ondoso, ma l'efficacia si riduce fortemente quando la permeabilità aumenta. In questo caso si ha una significativa riduzione dell'altezza d'onda trasmessa nella zona protetta ma gli effetti di riflessione e turbolenza intorno ai pali creano erosioni localizzate e sostanziale perdita di sedimenti nell'intorno delle opere.

Per migliorare il funzionamento della tipologia di intervento con pali, è stata condotta una sperimentazione anche in tre interventi di campo dove sono stati utilizzati sistemi di pali isolati con in testata inseriti elementi a stella triangolare al fine di generare una forte macroscabrezza in grado di provocare la dissipazione dell'energia delle onde; disponendo i pali su tre file, la fascia di dissipazione risulta sufficientemente ampia (fig.11).

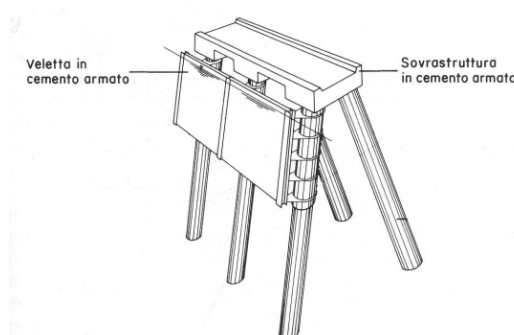


Figura 12 Barriera su pali

Le opere, progettate dalla Società Acquater su incarico della regione Marche, sono state sperimentate a S. Maria di Potenza e Porto Recanati in provincia di Macerata (Cipriani et al., 1984).

I risultati sono stati molto favorevoli nel primo sito dove si sono osservati un generalizzato avanzamento della linea di spiaggia ed un insabbiamento del sistema di pali, mentre nel secondo caso si sono verificate erosioni localizzate intorno ai pali ed una serie di rotture degli elementi in calcestruzzo che hanno determinato la necessità di una completa rimozione del sistema.

Tali opere, anche dove hanno favorito un incremento della superficie di spiaggia, hanno comunque creato problemi alla sicurezza dei bagnanti, soprattutto in presenza di mare mosso, per effetto della spigolosità dei manufatti in calcestruzzo e della turbolenza che in tale circostanza viene a crearsi all'interno del sistema di protezione.

2.5.5 Tecnoreef

Il modulo Tecnoreef è un manufatto in calcestruzzo armato che può essere assemblato, o prima di essere collocato sul fondo o sul fondo stesso, in svariate combinazioni. L'elemento di base è una piastra ottagonale forata che viene unita mediante bulloni ad altri due elementi analoghi formando una struttura di base con forma piramidale. A loro volta, le piramidi possono essere assemblate in varie forme e geometrie fornendo il *lay-out* finale del Reef (Fig. 12).

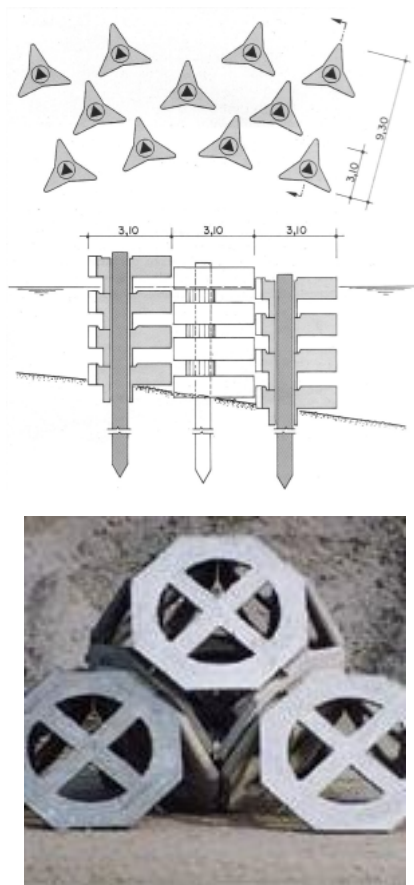


Figura 13 Modulo di Tecnoreef

La particolare capacità di offrire riparo al retrostante litorale consentendo al contempo il ripopolamento delle specie ha reso ampiamente diffuso l'impiego dei Tecnoreef. Ne sono esempi le barriere realizzate nel Lazio, in Liguria, in Puglia, Marche e Calabria.

2.5.6 Barriere in geotessuto

Negli ultimi anni sono state sperimentate e messe in opera nuove tipologie di barriere per la difesa della costa. Novità che hanno riguardato l'utilizzo di sistemi di produzione di energia anche a protezione della linea di costa e l'introduzione di nuovi materiali. In particolare uno dei materiali più utilizzati sia per la sua semplicità di messa in opera sia per la sua economicità è il geotessuto. Le barriere in geotessuto, sono barriere i cui elementi sono "sacchi" in geotessuto riempiti con sabbia prelevata in sito, spesso indicati anche come GSC (Geotextile Sand Container). Questo tipo di sistema, nel caso in cui gli elementi che costituiscono la barriera non sono sommersi, è esposto ad atti vandalici che possono compromettere l'integrità del singolo elemento e di conseguenza di tutta l'opera.

I più utilizzati geotessuti per la difesa costiera sono realizzati in polipropilene, poliestere e polietilene. Tali materiali presentano un'elevata deformabilità, che consente ai sacchi una volta riempiti di potersi adattare e risagomarsi in funzione delle caratteristiche del sottofondo su cui vengono posizionati. Inoltre sono caratterizzati da una buona permeabilità idraulica, che è funzione del loro spessore, richiesta per consentire un rapido drenaggio nel caso in cui essi siano sottoposti ad esempio a cicli mareali. Una caratteristica assai importante che è richiesta ai sacchi in geotessuto è la resistenza all'abrasione, specialmente qualora l'opera debba essere collocata in corrispondenza della zona di frangimento, oltre che la resistenza all'attacco di agenti microbiologici e chimici, all'ossidazione, alle radiazioni ultraviolette.

Riguardo alla durabilità dei geotessuti, trattandosi di materiali relativamente nuovi specie per le applicazioni di difesa costiera, non sono disponibili dati sperimentali certi relativamente alla vita utile del materiale. Nonostante le estrapolazioni suggeriscano che si possa assumere una durata dell'ordine dei 100 anni, ragionevolmente è possibile assumere una vita utile di circa 20-25 anni (*Oumeraci e Recio, 2009*). A titolo d'esempio si veda Figura 13.

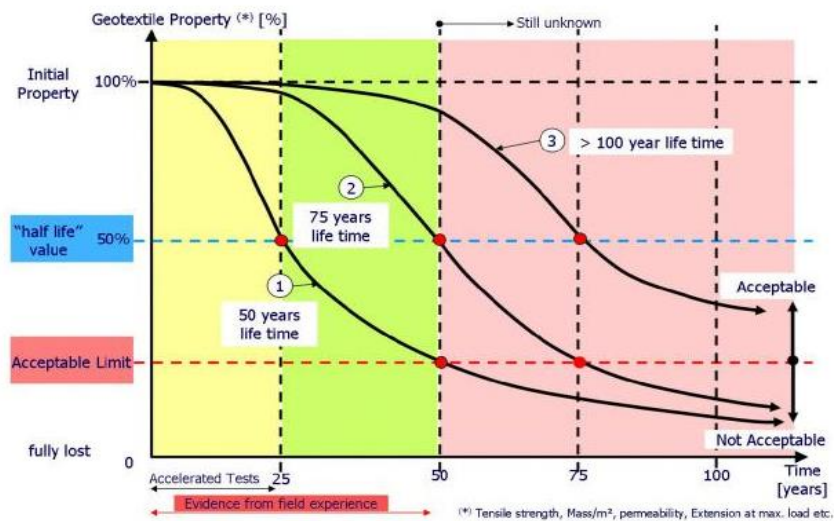


Figura 14 Vita utile dei sacchi in geotessuto (Oumeraci e Recio 2009).

I sacchi in geotessuto hanno trovato un largo impiego nella protezione dei litorali, principalmente per la loro versatilità e i costi più contenuti.

Uno dei primi esempi di uso di GSC per la difesa costiera è associabile alla realizzazione di rivestimenti e opere di protezione delle dune costiere. In tal caso i sacchi di geotessuto vengono disposti lungo la spiaggia per prevenire l'erosione e stabilizzare la duna durante lo storm surge. In fig.14 è mostrata l'applicazione dei GSC ai fini della realizzazione di una difesa aderente a protezione della duna costiera nell'isola di Sylt, in Germania.



Figura 15 Esempio di realizzazione di difesa aderente mediante sacchi in geotessuto: isola di Sylt, Germania

Anche i pennelli, emersi e sommersi vengono sovente realizzati con sacchi di geotessuto. Spesso in tal caso i sacchi non vengono coperti e sono dunque esposti all'azione diretta del moto ondoso, delle radiazioni solari, dell'abrasione; si rende necessario dunque un doppio strato di geotessuto, di modo che lo strato più interno garantisca la robustezza, quello più esterno la durabilità e la capacità antiabrasiva. In taluni casi è possibile prevedere una tintura che adegui il sacco all'ambiente costiero in cui va ad inserirsi.

Inoltre i sacchi di geotessuto possono essere utilmente adottati nella realizzazione dei nuclei delle strutture, emerse o soffolte, in massi; ciò solitamente avviene perché non c'è disponibilità di materiale roccioso o i costi di questo sono troppo elevati, per evitare l'infiltrazione di sedimenti attraverso la struttura, per ridurre la trasmissione del moto ondoso a tergo della struttura stessa, nonché per migliorare la stabilità nei confronti dell'erosione del nucleo e dei carichi sismici. D'altro canto effetti collaterali dell'impiego di GSC prevedono un incremento del set up e della risalita del moto ondoso sulla struttura, un aumento della tracimazione e della riflessione.

Non sono invece largamente diffuse strutture emerse o soffolte realizzate interamente con sacchi di geotessuto.

A seconda delle forze agenti e dei meccanismi di degradazione, i sacchi in geotessuto possono entrare in crisi per diverse cause:

- i) Instabilità idraulica;
- ii) cedimenti geotecnici;
- iii) degrado del geotessuto.

Con riferimento alla prima ragione di crisi, esistono alcune relazioni per valutare la stabilità dei sacchi in geotessuto, ottenute interpolando i risultati ottenuti a seguito di dettagliate campagne sperimentali.

Per i sacchi disposti lungo il paramento inclinato, l'azione dell'onda può portare allo scalzamento degli stessi; per la verifica della stabilità idraulica viene adattata la formula di Hudson valida per elementi lapidei:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1\right) D} = \frac{C_w}{\sqrt{\xi}}$$

Essendo ρ_E la densità dei sacchi ($\rho_E = (1-n)\rho_s + n\rho$), e D la dimensione caratteristica del sacco, che, esplicitando il parametro di Irribarren e dunque la pendenza della struttura $\tan\alpha$ assume la forma:

$$D = \frac{H_s^{3/4} T_p^{1/2} (\tan\alpha)^{1/2}}{C_w \left(\frac{2\pi}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1\right)}$$

con C_w un parametro empirico pari a 2.75. Sulla base di tale relazione è possibile ricavare la lunghezza del sacco l_c :

$$l_c = \frac{D}{\sin\alpha} = \frac{H_s^{3/4} T_p^{1/2}}{C_w \left(\frac{2\pi}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1\right) \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2}}}$$

Per quanto riguarda l'elemento posto sulla cresta della struttura, il cedimento può avvenire o per sollevamento durante il passaggio della cresta dell'onda, con un conseguente spostamento verso riva, o per scalzamento come nel caso precedente. Pertanto è lecito aspettarsi che la stabilità degli elementi disposti lungo la cresta sia più critica di quella degli elementi disposti lungo il paramento inclinato. In tal caso assume notevole importanza l'altezza (o la sommergenza) della cresta rispetto al livello medio del mare. Si utilizza pertanto la seguente relazione di stabilità:

$$N_s = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1\right) D} = 0.79 + 0.09 \frac{R_c}{H_s}$$

E quindi:

$$l_c = \frac{D}{\sin\alpha} = \frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho} - 1\right) \left(0.79 + 0.09 \frac{R_c}{H_s}\right) \sin\alpha}$$

Assume inoltre un'importanza significativa ai fini della valutazione della stabilità la deformazione del sacco sotto l'azione di onde più gravose, nonché dello spostamento del materiale solido all'interno dei sacchi: ciò infatti comporta una riduzione dell'area di contatto

tra i sacchi ed un aumento delle superfici esposte alle azioni di sollevamento e trascinamento esercitate dall'onda.

Si tenga presente che per poter dimensionare correttamente il geotessile bisogna essere in possesso di una serie di dati riguardanti la composizione granulometrica del terreno, la sua permeabilità e la sua composizione chimica, la quantità d'acqua da evacuare, le pressioni che agiscono sul geotessile normalmente al piano.

In termini esclusivamente idraulici, uno dei parametri più importanti è la trasmissività, che si ottiene moltiplicando il coefficiente di permeabilità planare del geotessile per il suo spessore espresso in metri. Essa è influenzata dalle condizioni del terreno, dalla composizione e quantità d'acqua da drenare, dal gradiente idraulico e dalla pressione applicata al piano del geotessile (maggiore è la pressione, minore è la trasmissività). Tutti questi fattori influiscono sul buon funzionamento del sistema drenante anche a lungo termine e, quindi, di essi si deve tenere conto nella fase progettuale dello stesso.

Vidal et al. (1992) ha individuato una relazione tra la profondità relativa della barriera dal livello medio del mare ed il numero di stabilità di una barriera in pietrame ottenendo quattro livelli di categorie di danno, Oumeraci et al. (2003) ha applicato la formula di Vidal et al (1992) alle barriere in geotessuto, applicazione più complessa in quanto entrano in gioco diversi parametri in particolare: il rapporto di riempimento in sabbia, il tipo di materiale geotessile e l'attrito all'interfaccia tra GSC influenzano in modo evidente i processi che regolano la stabilità della barriera. Hornsey et al. (2011) hanno sottolineato come il riempimento, la tipologia del geotessile ed una campagna sperimentale approfondita sono fattori chiave che influenzano la progettazione di un sistema di barriere in geotessile. Solo in questo modo gli ingegneri possono progettare in modo opportuno l'opera. Alcuni limiti evidenziati da Restall et al. (2002) nell'uso di questa tipologia di barriera sono la facilità di esser soggette ad azioni vandaliche e la durabilità dovuta all'attrito in particolare in zone in cui è presente sabbia a spigoli vivi o granulometrie maggiori.

Nel presente lavoro è stata sviluppata un'analisi sperimentale di laboratorio sui GSC in particolare si sono analizzati idrodinamica, morfodinamica e statica. E' stata fatta una campagna sperimentale in primo luogo riguardante l'analisi idrodinamica analizzando il coefficiente di trasmissione e di riflessione per diversi "treni" di onde sia regolari che irregolari. E' stata studiata la risposta dal punto di vista morfodinamico della sabbia in particolare lato

offshore della barriera e si è prestata attenzione alla stabilità dell'opera intesa sia del singolo sacchetto che della struttura nel suo complesso.

CAPITOLO 3

MODELLI FISICI

3.1 Generalità

In questo capitolo si riporta una sintesi dei principali criteri adottati nell'ambito della modellazione fisica di processi idro-morfodinamici costieri.

L'ingegneria costiera e marittima affronta lo studio di fenomeni complessi per i quali, per lo più, risulta difficile, se non impossibile, anche a costo di introdurre forti semplificazioni, una risoluzione in forma analitica chiusa.

Tra le tecniche "alternative" alle tradizionali, che consentono di ovviare alla difficoltà offerta da un approccio rigorosamente matematico, ricordiamo in particolare:

- misure e osservazioni di campo;
- misure e osservazioni di laboratorio;

queste costituiscono il cosiddetto "modello fisico", si utilizzano in alternativa o meglio in combinazione, alle elaborazioni numeriche che costituiscono il "modello matematico".

Nonostante nel campo delle discipline idrauliche si faccia un larghissimo impiego di calcolatori, le conoscenze acquisite con l'uso di metodi sperimentali e, in particolare, attraverso lo studio su modelli restano di straordinaria attualità.

I modelli infatti hanno diverse peculiarità: la chiarezza e verosimiglianza del fenomeno con quello reale, la possibilità di rappresentare tutte e tre le dimensioni del moto, la capacità di riprodurre geometrie complesse e soprattutto i moti turbolenti, un alto valore predittivo.

Tuttavia necessitano di laboratori attrezzati e lunghi tempi di costruzione e costi alti anche di gestione, grandi spazi, sistemi di controllo e misura complessi, inoltre non sono trascurabili gli effetti di scala ed in ultimo la rigidità delle condizioni al contorno.

3.2 Analisi dimensionale e teorema di Buckingham

Come sopra accennato, il moto dei fluidi è governato da un numero piuttosto ristretto di leggi fondamentali formulabili secondo un approccio differenziale o integrale. La presenza tuttavia

di non-linearità preclude una soluzione della maggior parte dei problemi di interesse pratico, a meno di introdurre approssimazioni.

Il carattere dell'approssimazione può pervenire da:

- semplificazioni analitiche (per esempio, usando i metodi perturbativi);
- uso di tecniche numeriche;
- adozione di soluzioni sperimentali.

In ognuno dei suddetti casi l'analisi dimensionale può fornire utili informazioni.

Un fenomeno della fisica può sempre essere espresso da una relazione funzionale del tipo:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

dove x_i sono le grandezze in gioco. E' chiaro come la funzione f può anche essere ignota, però essa deve certamente esistere (approccio deterministico della meccanica classica).

Le varie grandezze in gioco possono essere distinte in grandezze primarie e grandezze derivate.

Le grandezze primarie vengono assunte come fondamentali, possono essere misurate direttamente e la loro unità di misura è arbitraria. Nella meccanica classica le unità fondamentali sono tre: [L] [M] [T].

L'analisi dimensionale si basa sul principio di omogeneità dimensionale che sancisce, per ogni equazione che interpreta un fenomeno fisico, l'uguaglianza dimensionale di tutti i termini presenti in un'equazione. Nel caso di studi sperimentali essa fornisce criteri, non risultati, attraverso cui è possibile compattare e trasmettere in maniera efficiente le informazioni desunte dalle esperienze.

Il cuore dell'analisi dimensionale è rappresentato dal Teorema di Buckingham, il quale garantisce la riduzione delle variabili tramite la definizione di una relazione equivalente tra un più ristretto numero di parametri adimensionali costruiti nell'ipotesi di un'adeguata e sufficiente conoscenza di base del fenomeno in studio.

Il teorema di Buckingham o Π assicura che se un fenomeno fisico è governato da una relazione dimensionale omogenea tra n parametri dimensionali x_i :

allora esiste una relazione equivalente che interessa un numero più piccolo, $(n-k)$, di parametri adimensionali Π , costruiti a partire dalle x_i , del tipo:

$$\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-k})$$

La riduzione k è pari al numero di dimensioni indipendenti presenti nelle x_i . E' utile sottolineare come questo teorema indichi la possibilità di ridurre i parametri interessati dall'esperienza che si vuole condurre, ma non indica assolutamente come procedere. Infatti la scelta dei parametri adimensionali non è univoca.

3.3 Criteri di similitudine

Obiettivo della modellazione fisica è quello di predire un comportamento di un fenomeno reale, detto prototipo, attraverso le osservazioni su un modello "*in similitudine*" con il fenomeno stesso.

L'analisi dimensionale fornisce i criteri per mettere in relazione i dati ottenuti da esperimenti su modello ai valori attesi nel prototipo mentre la similitudine consente di determinare le condizioni da rispettare nel modello perché in esso siano riproducibili gli aspetti fondamentali del fenomeno reale.

Il focus del problema è quello di correlare le grandezze misurate sul modello con quelle associate al prototipo in studio.

Prototipo e modello sono in rapporto di similitudine idrodinamica se sono rispettate le condizioni di similarità geometrica, cinematica e dinamica, ovvero se sono rispettati i rapporti di scala tra le grandezze geometriche, tra le velocità e tra le forze rispettivamente.

La riproduzione del fenomeno con un modello a scala ridotta comporta difficoltà nel rispettare le proporzioni delle grandezze di piccola dimensione come la scabrezza di una superficie.

Inoltre, per la presenza di grandezze intensive, non è possibile rispettare contemporaneamente tutti i rapporti tra le forze che intervengono nel fenomeno. Si ricorda, ad esempio, come non sia possibile rispettare contemporaneamente il rapporto di scala dei numeri di Reynolds e di Froude di prototipo e modello.

I principali criteri di similitudine dinamica sono:

- Criterio di Reynolds: $\left(\frac{VL}{\nu}\right)_p = \left(\frac{VL}{\nu}\right)_m \Rightarrow \frac{N_v N_L}{N} = N_{Re} = 1$

Dove:

- ν = viscosità del fluido
- V = velocità caratteristica
- L = lunghezza caratteristica

- μ = viscosità cinematica
- ν = viscosità dinamica

Il criterio deve essere rispettato quando si riproducono fenomeni nei quali le dissipazioni di natura viscosa sono rilevanti.

- Criterio di Froude: $\left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_m \Rightarrow \frac{N_v}{\sqrt{N_L N_g}} = N_{Fr} = 1$

Dove:

- p = densità del fluido
- V = velocità caratteristica
- L = lunghezza caratteristica
- g = accelerazione di gravità

Il criterio deve essere rispettato quando si riproducono moti con superficie a pelo libero.

- Criterio di Eulero: $\left(\frac{p}{V^2}\right)_p = \left(\frac{p}{V^2}\right)_m \Rightarrow \frac{N_p}{N N_v^2} = N_{Eu} = 1$

- p = pressione del fluido;
- ρ = densità del fluido;
- V = velocità caratteristica;

Il criterio deve essere rispettato quando sono predominanti le forze esercitate dalla pressione.

- Criterio di Weber: $\left(\frac{V^2 L}{\sigma}\right)_p = \left(\frac{V^2 L}{\sigma}\right)_m \Rightarrow \frac{N N_v^2 N_L}{N} = N_{We} = 1$

dove:

- σ = tensione superficiale;
- p = pressione del fluido;
- ρ = densità del fluido;
- V = velocità caratteristica;

Il criterio deve essere rispettato quando si riproducono fenomeni in cui le tensioni superficiali divengono comparabili alle forze di inerzia, cioè in presenza di un'interfaccia tra due fluidi.

- Criterio di Mach: $\left(\frac{V}{c}\right)_p = \left(\frac{V}{c}\right)_m \Rightarrow \frac{N_V}{N_c} = N_{Ma} = \frac{N N_V^2}{N} = N_{Ca} = 1$

dove:

- c = tensione superficiale

Il criterio deve essere rispettato quando le forze d'inerzia sono tali da poter modificare la compressibilità del fluido.

- Criterio di Strouhal: $\left(\frac{L}{V}\right)_p = \left(\frac{L}{V}\right)_m \Rightarrow \frac{N N_L}{N_V} = N_{\text{St}} = 1$

dove:

= velocità angolare;

Il criterio deve essere rispettato nella modellazione di propagazione del moto ondoso.

Si ricorda che nella modellazione delle grandezze intensive si assume un fattore di scala pari ad 1.

3.4 Modelli fisici

I modelli fisici utilizzati nello studio dei fenomeni dell'idraulica marittima possono essere classificati in due grandi categorie:

- modelli a fondo fisso, adatti per lo studio dei fenomeni idrodinamici connessi alla propagazione del moto ondoso, detti anche modelli idrodinamici;
- modelli a fondo erodibile, utilizzati nello studio dei fenomeni connessi al trasporto solido causato dal moto ondoso.

A fianco a tali categorie meritano essere ricordati anche i modelli di strutture costiere.

3.4.1 Modelli a fondo fisso

I modelli a fondo fisso si distinguono in:

- modelli ad onde corte, utilizzati per studiare gli effetti delle onde generate dal vento sulle coste e sulla navigazione;
- modelli ad onde lunghe, utilizzati per studiare gli effetti delle maree, degli tsunami su porti, estuari, etc.

Il parametro utilizzato per discriminare i due tipi di modelli è basato sul numero d'onda k ; la condizione perché si abbiano modelli a onde corte è la seguente:

$$kh > \frac{1}{10} \quad \text{overo} \quad \frac{h}{L} > \frac{1}{20}$$

Qualora si voglia evidenziare solo l'aspetto connesso alla propagazione lungo una direzione spaziale, si adottano canalette o vasconi bidimensionali.

I modelli a onde corte sono particolarmente impiegati nello studio di fenomeni quali:

- cinematica e meccanica non lineare delle onde;
- shoaling e breaking;
- rifrazione e diffrazione;
- riflessione e trasmissione;
- run up e overtopping;
- impatto di onde su strutture;
- interazione onde-correnti;
- trasporto solido e formazione di forme di fondo;
- strato limite e turbolenza;
- etc.

Per ricavare le condizioni di similarità si considerino le equazioni di continuità e del moto in forma adimensionale, tenendo conto anche degli sforzi di Reynolds:

$$\frac{u}{x} + \frac{v}{y} + \frac{w}{z} = 0 \quad \text{Eq. di continuità}$$

Eq. di moto:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -E \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u} \bar{w}}{\partial z} \right)$$

$$S \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Eu \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial U \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v} \bar{w}}{\partial z} \right)$$

$$S \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Eu \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{Fr^2} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial U \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} \right)$$

Ammettendo che la similarità geometrica sia rispettata, le condizioni per una perfetta similitudine in un modello idrodinamico ad onde corte discendono dall'uguaglianza dei parametri adimensionali che compaiono nelle equazioni del moto di Reynolds; sono date cioè dal rispetto dei criteri di:

- Froude: $\frac{N_v}{\sqrt{N_g N_L}} = 1$
- Reynolds: $\frac{N_L N_v}{N} = 1$
- Strouhal: $\frac{N_L}{N_v N_T} = 1$
- Eulero: $\frac{N_P}{N N_{v^2}} = 1$

Tenuto conto che la similitudine secondo il criterio di Eulero è verificata soddisfacendo gli altri criteri, segue che rispettando i criteri di Froude e di Strouhal, si assicura la similitudine di tutti i termini delle equazioni del moto meno quelli viscosi. Il soddisfacimento di entrambi tali criteri si traduce nella condizione sul rapporto di scala delle frequenze di oscillazione w :

$$N_w = 1/N_T = N_L^{1/2}$$

Modelli a onde corte scaleggiati secondo questi criteri mantengono la similitudine di fenomeni dissipativi dovuti alla turbolenza.

Il mancato rispetto del criterio di Reynolds comporta invece che la similitudine sia valida in tutto il campo di moto meno che nello strato limite.

Questa approssimazione causa l'introduzione di effetti di scala di cui occorre tener conto: difatti è sempre presente una attenuazione dell'onda dovuta a scorrimenti viscosi. Se, d'altro canto, gli effetti viscosi sono rilevanti, occorre mettere a punto modelli che rispettino il criterio di Reynolds a scapito di altri criteri, come ad esempio quelli realizzati con strumenti particolari come il tubo ad U.

Negli esperimenti in cui occorra studiare lo strato limite laminare, è necessario scaleggiare l'intero modello secondo la similitudine di Reynolds, assumendo come grandezze caratteristiche la velocità e lo spessore dello strato limite.

Nei modelli in scala di Froude lo strato limite turbolento è in similitudine con il prototipo in quanto gli sforzi turbolenti non sono influenzati dalla viscosità. Nei modelli a fondo fisso quindi lo strato limite turbolento può essere modellato rendendo opportunamente scabro il fondo. Kamphuis (1973) propose la relazione:

$$\frac{\tau_{0\max}}{U_0^2} = 0.24 \left(\frac{k_s}{a} \right)^{3/4}$$

- $\tau_{0\max}$ =sforzo tangenziale al fondo
- U_0 =velocità orbitale al fondo
- k_s =scabrezza del fondo
- a =ampiezza orbitale

Da tale relazione si ricava il seguente criterio di similitudine:

$$N_0 = N N_{U_0}^2 \left(\frac{N_{k_s}}{N_a} \right)^{3/4} = N \sqrt{NgN_L}^2 \left(\frac{N_{k_s}}{N_a} \right)^{3/4}$$

e assumendo che tutte le grandezze lineari abbiano lo stesso rapporto di scala, si ha:

$$N_0 = N N_L$$

Analogo rapporto di scala si otterrebbe per le tensioni tangenziali al fondo dalla similitudine di Froude. E' opportuno tuttavia non scaleggiare la scabrezza mediante il medesimo rapporto di scala delle lunghezze per evitare effetti di scala.

Nella pratica la modellazione dello strato limite viene realizzata tramite un'apposita apparecchiatura costituita da un tubo a U all'interno del quale viene generato un moto oscillante per mezzo di una coppia di pistoni. Lo strato limite riprodotto ha il limite di non variare secondo la direzione longitudinale, differentemente da quanto accade in natura. Nella realtà esso dipende dal moto irrotazionale esterno che ha direzione diversa al di sotto di una cresta o di un cavo, generando una variabilità nello spessore dello strato limite, con conseguente formazione di un moto secondario.

I modelli a onde lunghe sono utilizzati principalmente per lo studio di complessi di estuari, porti, etc. Pertanto vengono realizzati per lo più in estesi bacini, in cui è possibile riprodurre moti di lungo periodo come ad esempio le maree o gli tsunami. Data la loro estensione i costi

sia di messa a punto che di esercizio fanno sì che essi tendano a scomparire e lasciare il posto a modelli ibridi, che accoppiano il campo di moto risolto mediante modelli numerici a modelli fisici che coprano solo aspetti specifici che non possono essere adeguatamente trattati mediante modellazione numerica.

Il moto generato dalla presenza di onde lunghe è caratterizzato da una componente orizzontale di velocità uniforme sulla profondità, mentre la verticale risulta trascurabile. E' ragionevole trascurare gli sforzi di Reynolds, in quanto le dissipazioni turbolente si sviluppano su brevi distanze. Mediando sulla profondità, in forma adimensionale:

Eq. di continuità :

$$\frac{u(h+)}{x} + \frac{u(h+)}{y} = \frac{\partial}{\partial t};$$

Eq. di moto:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = Fr^2 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\frac{X}{Z} \right)^2 \frac{1}{h+} \frac{\partial u}{\partial z} \right]_h$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = Fr^2 \frac{\partial}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \left(\frac{X}{Z} \right)^2 \frac{1}{h+} \frac{\partial v}{\partial z} \right]_h$$

dove:

- η =elevazione d'onda
- X =lunghezza scala in direzione x
- Z =lunghezza scala in direzione z

Nelle equazioni del moto e di continuità compaiono quattro rapporti adimensionali: affinché ci sia similitudine occorre pertanto che vengano rispettati i rispettivi criteri:

$$\begin{array}{ll} 1) \text{ Froude: } \frac{N_v}{\sqrt{N_g N_z}} = 1 & 2) \text{ Strouhal: } \frac{N_x}{N_v N_t} = 1 \\ 3) \text{ Reynolds: } \frac{N_x N_v}{N} = 1 & 3) \text{ geometrico: } \frac{N_x}{N_z} = 1 \end{array}$$

L'ultima condizione richiede che il modello sia non distorto verticalmente. Un modello a onda lunga può rappresentare correttamente gli sforzi tangenziali verticali solo se è verticalmente non distorto.

In genere nei modelli a superficie libera, l'adozione del criterio di Froude porta ad assumere che gli effetti della viscosità, dell'elasticità, della tensione superficiale siano trascurabili rispetto a quelli gravitazionali.

In modelli a scala ridotta, la bassa profondità può essere tale che le forze di tensione superficiale, irrilevanti nel prototipo, influenzino sensibilmente il campo di moto del modello. Una soluzione spesso adottata è quella di ricorrere a modelli a scale distorte, violando tuttavia il criterio di similarità geometrica.

3.4.2 Generazione delle onde in laboratorio

I dispositivi per la generazione delle onde (ondogeni) consistono di servosistemi idraulici e strumenti elettronici (computer e generatori di funzione) per l'azionamento, la gestione e il controllo. Gli ondogeni utilizzano per la generazione del moto ondoso battitori:

- a pistone: generano il moto ondoso tramite un movimento alternato orizzontale;
- a ventola: generano il moto ondoso attraverso una rotazione attorno ad un asse.

Gli effetti di laboratorio in canalette e vasche per la riproduzione del moto ondoso sono principalmente causati:

- dalla rappresentazione unidirezionale;
- dalla generazione di effetti non lineari o onde trasversali ad opera dei meccanismi di generazione;
- dalla riflessione dell'onda al bordo della vasca opposto al generatore: nella realtà le onde riflesse si smorzano e spariscono al largo, mentre nel modello anche in presenza di un profilo assorbente di spiaggia, si generano complessi meccanismi di riflessione, che portano alla sovrapposizione di armoniche di disturbo al segnale di partenza.

In conclusione, non è possibile eliminare gli effetti di scala senza introdurne altri; è tuttavia possibile minimizzarli ricorrendo a metodi empirici o quantificarli per tenerne conto nell'interpretazione dei risultati.

3.4.3 Modelli a fondo mobile

In idraulica marittima i modelli a fondo mobile sono utilizzati nello studio di problemi di trasporto e deposito di sedimenti non coesivi causato dall'azione forzante del moto ondoso.

La realizzazione di modelli a fondo mobile è particolarmente complessa in quanto non è ancora oggi completamente conosciuta l'influenza degli effetti di scala su tali modelli.

I modelli a fondo mobile sono utilizzati principalmente nello studio del trasporto solido dovuto a moto ondoso e/o correnti, in particolare:

- evoluzione del profilo di spiaggia;
- erosione delle dune;
- formazione e propagazione di ripples;
- risposta di spiagge di ciottoli all'azione delle onde;
- fenomeni di erosione localizzata;
- formazione di lingue di sabbia (spits).

Vie intermedie sono modelli idrodinamici in cui limitate quantità di sedimenti fungano da traccianti per fornire un'idea qualitativa dei fenomeni di erosione e deposito.

Il trasporto solido può avvenire secondo due modalità differenti: al fondo e in sospensione. Non è possibile realizzare un modello in grado di riprodurre entrambi i fenomeni, e occorre privilegiare uno dei due aspetti.

Inoltre, poiché le cause che generano il trasporto sono molteplici (onde corte, lunghe, correnti, etc.) e non tutte contemporaneamente riproducibili nel modello, i modelli a fondo mobile devono essere utilizzati con grande attenzione e accuratamente validati con dati di campo.

Se il moto ondoso è generato da onde e correnti si può:

- assumere il trasporto generato da correnti unidirezionali e aggiungere il moto ondoso successivamente;
- assumere il trasporto generato da moto ondoso e aggiungere successivamente le correnti.

I parametri adimensionali che entrano in gioco nei modelli a fondo mobile sono:

- numero di Reynolds dei sedimenti:

$$R_d = \frac{U_0 d_m}{\nu}$$

- numero di Froude dei sedimenti (o “densimetrico”):

$$F_d = \frac{U_0}{\sqrt{(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)gd_m}}$$

- densità relativa dei sedimenti:

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho}$$

- lunghezza relativa:

$$l_s = \frac{\lambda}{d_m}$$

dove:

- H: ampiezza dell'onda;
- T: periodo dell'onda;
- L: lunghezza d'onda;
- λ : lunghezza caratteristica;
- h: profondità;
- g: accelerazione di gravità;
- k_s : dimensione lineare della scabrezza superficiale;
- ρ : densità del fluido;
- ν : viscosità cinematica del fluido;
- d_m : diametro medio dei sedimenti;
- ρ_s : densità dei sedimenti;
- $\gamma_i = g(\rho_s/\rho - 1)$: peso specifico immerso nel sedimento;
- τ_b : tensione tangenziale al fondo;
- ω_s : velocità di sedimentazione;
- $U_0 = (\tau_b/\rho)^{1/2}$: velocità al fondo.

Il primo problema che sorge nella realizzazione di un modello a fondo mobile è la ricerca del corretto fattore di scala per i sedimenti. Il rispetto del rapporto di scala geometrico porterebbe all'utilizzo di sedimenti di dimensioni talmente piccole da risultare coesivi. Nella pratica si ricorre pertanto a sedimenti con caratteristiche differenti rispetto al prototipo.

Poiché inoltre il moto dei sedimenti all'interno dello strato limite può essere laminare occorre o garantire che il moto al fondo sia turbolento o violare altre condizioni di similarità per riprodurre correttamente gli effetti della viscosità.

Le difficoltà nella realizzazione della completa similitudine nei modelli a fondo mobile sono numerose. Innanzitutto, occorrerebbe scalare i sedimenti secondo il rapporto di scala geometrico ma questo, come è stato accennato, comporta l'utilizzo di materiale di dimensioni unitarie estremamente piccole. Si ricorda che oltre certi limiti ($d_m < 0,08 \text{ mm}$) si verifica nel modello l'insorgere di fenomeni coesivi, che certamente non hanno luogo nel prototipo in quanto il trasporto solido interessa solamente materiali con proprietà non coesive. Nella pratica di laboratorio è ormai consolidato l'utilizzo di materiali con dimensioni e densità differenti dai sedimenti del prototipo.

Un'altra difficoltà consiste nel non poter trascurare gli effetti della viscosità in quanto il moto dei sedimenti nello strato limite può essere laminare: occorre quindi garantire condizioni di moto turbolento al fondo, oppure violare altre condizioni di moto turbolento al fondo, oppure violare altre condizioni di similarità.

L'impossibilità di realizzare completa similitudine tra prototipo e modello è quindi accettata e giudicata non influente al fine di riprodurre l'evoluzione del fondo con sufficiente attendibilità. Le diverse scelte sono sintetizzate nella Tabella 3.1:

tipologia di modello	R_d	F_d	s	l_s	V_s
Best Model (BM)	°	•	•	•	°
Lightweight Model (LM)	•	•	*	°	°
Densimetric Froude Model (DFM)	°	•	*	°	°
Sand Model (SM)	°	°	•	°	°

Tabella 3-1 Tipologie di modelli a fondo mobile

Legenda:

• Soddisfatto

° Non soddisfatto

* Non soddisfatto nel range $1.05 < s < 2.65$

I modelli BM sono quelli che più si avvicinano alla similitudine completa; poiché invocano il rispetto del criterio di densità relativa, possono essere adottati solo se le densità dei sedimenti del prototipo sono piuttosto elevate. Si introducono inoltre effetti di scala legati all'aver trascurato gli effetti della viscosità.

I modelli LM, grazie all'impiego di sedimenti alleggeriti consentono il rispetto simultaneo dei criteri di Froude e Reynolds; tuttavia si generano effetti di scala. Il mancato rispetto del criterio di densità relativa può aumentare in maniera significativa il trasporto in sospensione; non rispettare il criterio geometrico porta ad una non corretta riproduzione delle forme di fondo.

Inoltre, la maggiore porosità dei sedimenti provoca un maggiore assorbimento di energia da parte del fondo; infine non scaleggiare correttamente la velocità di sedimentazione comporta la mancata similitudine del trasporto in sospensione.

Nonostante nei modelli a sedimenti alleggeriti viene rispettata sia la similitudine di Reynolds che quella di Froude (cosicché modello e prototipo sono rappresentati dal medesimo punto sul diagramma di Shield e quindi le condizioni di moto incipiente sono in similitudine), sono violati gli altri criteri, con l'introduzione dei seguenti effetti di scala:

- scalare non correttamente la densità comporta una sottostima della velocità del trasporto solido e la possibilità di un incremento del trasporto in sospensione, alterando così la modalità del trasporto nel modello;
- scalare non correttamente la lunghezza relativa comporta una non corretta riproduzione delle forme di fondo, come i ripples, che dipendono da essa; l'alterazione conseguente della scabrezza comporta cambiamenti nella turbolenza;
- la maggiore porosità dei sedimenti alleggeriti comporta un maggior assorbimento di energia dell'onda da parte del fondo;

non scalare correttamente la velocità relativa di sedimentazione comporta la non similitudine del trasporto in sospensione. Il ricorso a sedimenti alleggeriti è quindi scoraggiato dall'entità di tali effetti di scala e fondo.

I modelli DFM presentano tutti gli effetti di scala dei modelli LM con l'introduzione dell'errore derivante dal non aver scaleggiato la viscosità.

Infine i modelli SM possono comportare seri errori di valutazione nel trasporto solido legati al non aver tenuto in conto il criterio di Froude.

Nel nostro caso, si è optato all'utilizzo di quest'ultimo modello (Sand model) per una maggiore semplicità di realizzazione del modello stesso e perché si è ritenuto che comunque la granulometria adottata ($d_{50} = 0.25$ mm) per la campagna sperimentale fatta interferiva in modo non determinante sui risultati finali ottenuti.

CAPITOLO 4

METODO PER LA STIMA DEL COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE IN LABORATORIO

4.1 Generalità

In letteratura sono stati proposti vari metodi per la stima del coefficiente di riflessione sulla base di misure sperimentali sia in presenza di onde regolari (*Isaacson, 1991*) sia in presenza di onde irregolari, caso quest'ultimo di maggiore rilevanza ai fini ingegneristici, (*Thornton e Calhoun, 1972* e *Goda e Suzuki, 1976, Mansard e Funke, 1980*).

Limitatamente al caso di onde regolari, il metodo concettualmente più semplice (ma operativamente più oneroso) per la stima della riflessione è il cosiddetto “metodo dell'inviluppo”. Esso consiste nel misurare, tramite l'uso di una sonda di livello, l'altezza minima e massima dell'inviluppo ottenuto dalla sovrapposizione del moto ondoso incidente e di quello riflesso. L'onerosità operativa di questo metodo consiste nella necessità di dovere effettuare un elevato numero di misure, spostando in maniera pressochè continua la sonda all'interno di una lunghezza d'onda. Inoltre tale metodo non fornisce nessuna informazione sulla fase dell'onda riflessa.

Nel caso di onde random, sono stati proposti diversi metodi basati sull'adozione di due o più sonde di livello posizionate a una distanza fissata, che possono essere applicati anche al caso di onde regolari, a patto che la distanza tra le sonde sia scelta in modo tale da ricadere, per una fissata condizione idrodinamica, all'interno dei limiti di validità del metodo.

In particolare nel seguito verrà descritto il metodo proposto da *Mansard e Funke, (1980)*, che fa uso di tre sonde poste a una distanza fissata. Analiticamente il metodo fa uso della tecnica della trasformata di Fourier ed è diventato il metodo standard per la misura della riflessione in laboratorio. Infatti, la stima del coefficiente di riflessione ottenuta applicando tale metodo si è rivelata più accurata rispetto a quella ricavata utilizzando altri metodi di letteratura, soprattutto nel caso di strutture ad alta capacità riflettente.

4.2 Stima del coefficiente di riflessione

Nel caso in esame si è utilizzata una canaletta per la generazione del moto ondoso, all'interno della quale è installata una barriera soffolta (costituita da sacchi in geotessuto riempiti di sabbia) che deve essere testata per quanto attiene alla riflessione e trasmissione del moto ondoso a tergo della struttura.

Le onde incidenti, prodotte da un battitore a pistone per la generazione del moto ondoso, vengono riflesse dal modello e si propagano in direzione opposta verso la pala del battitore stesso, dove sono soggette a una nuova riflessione. Quindi si propagano di nuovo verso la struttura e vengono ancora riflesse, e il processo si ripete molte volte. All'interno del canale si genera dunque un processo di riflessione multipla di treni d'onda.

Le onde che si propagano all'interno della canaletta sono dunque il risultato della sovrapposizione dell'onda incidente generata e della somma delle onde successivamente generate per riflessione dalla struttura e dalla pala stessa del battitore.

Benché il processo possa apparire complicato, nel caso di onde monocromatiche le componenti di queste onde generate dal processo di riflessione multipla hanno tutte la stessa frequenza e possono pertanto essere rappresentate come un singolo treno di onde. Inoltre, non solo tutte le componenti hanno la stessa frequenza ma anche le differenze di fase tra le varie componenti sono fissate. Volendone fare una trattazione analitica, per una data frequenza il profilo di onde rispettivamente incidenti e riflesse può essere sintetizzato come:

$$\begin{aligned}\eta_i &= a_i \cos(kx - \omega t + \varepsilon_i), \\ \eta_r &= a_r \cos(kx + \omega t + \varepsilon_r),\end{aligned}$$

in cui i pedici i e r indicano rispettivamente le grandezze relative all'onda incidente e all'onda riflessa e la coordinata spaziale x si assume positiva nel verso che va dal battitore al modello della struttura.

Si supponga di registrare il profilo della superficie libera in due punti (ossia in corrispondenza delle due sonde), aventi ascissa $x=x_1$ e $x=x_2=x_1+\Delta$, in cui Δ è la distanza di separazione tra le sonde. I profili d'onda possono essere espressi come

$$\begin{aligned}\eta_1 &= (\eta_i + \eta_r)_{x=x_1} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \\ \eta_2 &= (\eta_i + \eta_r)_{x=x_2} = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t\end{aligned}$$

in cui

$$\begin{aligned}
A_1 &= a_i \cos \varphi_i + a_r \cos \varphi_r \\
B_1 &= a_i \sin \varphi_i - a_r \sin \varphi_r \\
A_2 &= a_i \cos(k\Delta + \varphi_i) + a_r \cos(k\Delta + \varphi_r) \\
B_2 &= a_i \sin(k\Delta + \varphi_i) - a_r \sin(k\Delta + \varphi_r) \\
\phi_i &= kx_1 + \varepsilon_i \\
\phi_r &= kx_1 + \varepsilon_r
\end{aligned}$$

In quanto sopra le equazioni (4.3) rappresentano un sistema di quattro equazioni contenenti le quattro incognite a_i , a_r , φ_i e φ_r . Eliminando a_r e φ_r dall'espressione per A_2 e B_2 si ottiene

$$\begin{aligned}
A_2 &= (A_1 \cos k\Delta + B_1 \sin k\Delta) - 2a_i \sin k\Delta \sin \varphi_i \\
B_2 &= (-A_1 \sin k\Delta + B_1 \cos k\Delta) + 2a_i \sin k\Delta \cos \varphi_i
\end{aligned}$$

La quantità a_i può essere ottenuta eliminando i termini contenenti φ_i nelle equazioni precedenti, e analogamente si può ottenere a_r . Il risultato è

$$\begin{aligned}
a_i &= \frac{1}{2|\sin k\Delta|} \left[(A_2 - A_1 \cos k\Delta - B_1 \sin k\Delta) + (B_2 + A_1 \sin k\Delta - B_1 \cos k\Delta)^2 \right]^{1/2} \\
a_r &= \frac{1}{2|\sin k\Delta|} \left[(A_2 - A_1 \cos k\Delta - B_1 \sin k\Delta) + (B_2 - A_1 \sin k\Delta - B_1 \cos k\Delta)^2 \right]^{1/2}
\end{aligned}$$

Così, le ampiezze a_i e a_r delle onde incidenti e riflesse possono essere calcolate dalle quattro ampiezze A_1 , B_1 , A_2 e B_2 e dalla differenza di fase $k\Delta$. Inoltre, la fase angolare φ_i può essere ottenuta eliminando i termini contenenti a_i nell'equazione (4.5), e così per φ_r , come già dimostrato da *Fan (1988)*. Si ottiene quindi:

$$\begin{aligned}
\varphi_i &= \tan^{-1} \left[\frac{-A_2 + A_1 \cos k\Delta + B_1 \sin k\Delta}{B_2 + A_1 \sin k\Delta - B_1 \cos k\Delta} \right], \\
\varphi_r &= \tan^{-1} \left[\frac{-A_2 + A_1 \cos k\Delta - B_1 \sin k\Delta}{-B_2 + A_1 \sin k\Delta + B_1 \cos k\Delta} \right].
\end{aligned}$$

Il metodo di risoluzione sopra descritto può essere applicato a ogni componente dello spettro di Fourier dei profili di onde irregolari registrati alle due sonde, poste ad un'appropriata distanza.

Un'ipotesi alla base dell'analisi di *Goda e Suzuki (1976)* presentata è che la relazione di dispersione (relazione tra il numero d'onda k e la frequenza f) sia soddisfatta all'interno dell'intervallo di analisi.

Le ampiezze a_i e a_r , così stimate per ogni componente di Fourier, rappresentano l'ampiezza quadratica media $|A_k^2 + B_k^2|^{1/2}$ per il profilo d'onda. Una volta nota l'ampiezza delle singole componenti, gli spettri delle onde incidenti e riflesse possono essere stimati separatamente.

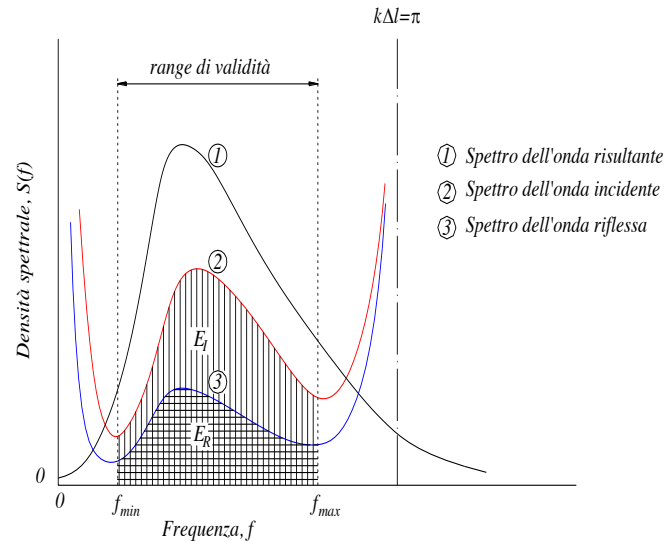


Figura 16 Schema della soluzione spettrale delle onde incidenti e riflesse.

Il risultato della risoluzione spettrale ottenuta con questo metodo è mostrata schematicamente in 15. Si osservi come la stima spettrale diverga in prossimità delle frequenze che soddisfano la condizione $k \Delta = n\pi$, per $n=0,1,2,\dots$, perché il fattore $|\sin k\Delta|$ a denominatore del secondo membro delle (4.6) diventa molto piccolo, e quindi errori dovuti a rumore del segnale vengono fortemente amplificati. Le stime spettrali sono quindi valide solo all'interno di un range di valori di frequenza il quale non contiene i punti caratterizzati da $k \Delta = n \pi$. L'effettivo campo di validità del metodo può quindi essere stimato sulla base delle seguenti indicazioni di massima,

$$\text{Limite superiore } (f_{\max}) : \Delta / L_{\min} \cong 0.45,$$

$$\text{Limite inferiore } (f_{\min}) : \Delta / L_{\max} \cong 0.05.$$

I simboli L_{\min} e L_{\max} denotano le lunghezze d'onda rispettivamente associate ai limiti superiore (f_{\max}) e inferiore (f_{\min}) dell'effettivo campo di validità per le frequenze.

Una volta che la distanza tra due sonde è stata fissata, l'effettivo range di frequenza per la determinazione delle onde incidenti e riflesse può essere determinato a partire dalle espressioni (4.8). Ovvero, ragionando in modo duale, nella progettazione di un modello idraulico, la distanza Δl dovrebbe essere scelta in modo tale che la maggior parte dell'energia dello spettro dell'onda da testare sia contenuta all'interno del range di frequenze delimitato da f_{\min} e f_{\max} .

Per quanto concerne la stima del coefficiente di riflessione, si devono calcolare l'energia del moto ondoso incidente e quella del moto ondoso riflesso, rispettivamente E_i e E_r , all'interno del range (f_{min}) - (f_{max}) . Questo può essere fatto considerando le seguenti espressioni

$$E_i = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_i(f) df = \frac{\Delta t}{2t_0} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} I_i$$

$$E_r = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_r(f) df = \frac{\Delta t}{2t_0} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} I_r$$

in cui S_i e S_r sono le densità spettrali dell'onda incidente e dell'onda riflessa mentre I_i e I_r sono i periodogrammi delle onde incidenti e riflesse, uguali rispettivamente a Na_i^2 e Na_r^2 . Il calcolo viene condotto meglio considerando i periodogrammi in quanto si evitano gli effetti di perdita dell'energia (*leakage*) in prossimità delle bande di frequenza, introdotti attraverso l'uso di un filtro per il trattamento del periodogramma (al fine di ridurre le irregolarità). Poiché l'energia delle onde incidenti e riflesse deve essere proporzionale al quadrato delle rispettive altezze d'onda, il coefficiente di riflessione, definito come rapporto tra altezze d'onda, può essere espresso in termini energetici come

$$K_R = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}}$$

Questo coefficiente di riflessione rappresenta quello del gruppo d'onde come “unicum”. L'altezza significativa dell'onda incidente H_{si} e quella dell'onda riflessa H_{sr} sono state valutate dalle ampiezze delle singole componenti spettrali utilizzando la relazione:

$$H_s = 4\sqrt{\sum \frac{1}{2} a^2}$$

Nell'applicazione del metodo gli autori raccomandano che le sonde siano localizzate a una distanza maggiore di una lunghezza d'onda dell'onda significativa dal modello della struttura e dalla pala del battitore.

La tecnica sopra descritta per la risoluzione del problema della scomposizione dell'onda incidente e dell'onda riflessa può essere direttamente applicata a treni d'onde regolari. In questo caso il coefficiente di riflessione può essere ottenuto come rapporto a_r/a_i . Inoltre, l'uso delle fasi angolari φ_i e φ_r , risolte utilizzando le espressioni (4.7), insieme con la conoscenza dei valori delle ampiezze a_i e a_r rende possibile ricostruire i profili dei treni d'onde incidenti e riflessi. Applicando questa tecnica per tutte le componenti di Fourier del treno d'onde irregolari

(all'interno del range di frequenza valido per la risoluzione), possono essere ricostruiti anche i profili delle onde irregolari incidenti e delle onde irregolari riflesse.

In diversi laboratori idraulici, la tecnica è stata estesa a una matrice lineare di sonde al fine di superare il problema della divergenza del metodo nell'intorno di $k \Delta = n \pi$. Per esempio, utilizzando tre sonde, nel caso in cui un paio di esse dovesse fallire nel trovare la corretta soluzione, l'altro paio può consentire di ottenere stime non divergenti. Utilizzando, quindi, tre sonde i problemi di divergenza del metodo sono notevolmente ridotti ed è pertanto possibile estendere il campo di validità del metodo.

Per il calcolo del coefficiente di trasmissione è necessario calcolare l'altezza d'onda incidente con il metodo anzi descritto, in modo da depurarla dalla componente di riflessione indotta dalla struttura e quindi calcolare il rapporto:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$

In cui l'altezza d'onda trasmessa a tergo della struttura andrebbe depurata anch'essa dalla componente riflessa.

CAPITOLO 5

DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

5.1 Generalità

Nel presente paragrafo viene descritta l'apparecchiatura sperimentale e la strumentazione utilizzate per la conduzione delle prove effettuate. Lo studio ha riguardato l'analisi dal punto di vista idrodinamico, morfodinamico e statico di una struttura in geotessuto. Nel corso delle prove, come verrà spiegato in dettaglio in seguito, si è reso necessario apportare piccole modifiche al modello fisico realizzato per ridurre il più possibile imprecisioni di realizzazione che avrebbero potuto comportare errori grossolani sul risultato finale.

5.2 Descrizione dell'apparecchiatura sperimentale

Le prove sperimentali sul modello sono state effettuate nel laboratorio di idraulica e costruzioni idrauliche del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Messina, in un canale lungo 18 m, di sezione rettangolare larga 40 cm e alta 80 cm, rappresentato in fig.16 .

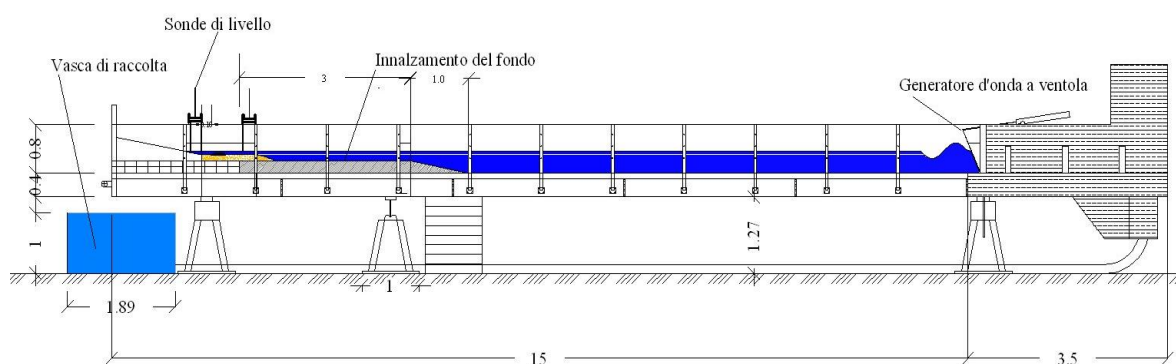


Figura 17 Sezione dell'apparecchiatura sperimentale del laboratorio di idraulica e costruzioni idrauliche del Dipartimento di Ingegneria di Messina

Le pareti verticali del canale sono realizzate con lastre di vetro opportunamente fissate su una intelaiatura metallica per tutta la lunghezza utile del canale, pari a 15 m.

La generazione del moto ondoso avviene tramite un battitore del tipo a ventola costituito da una pala metallica di forma rettangolare collegata ad un pistone oleodinamico controllato mediante

un regolatore industriale (Gefran 2500) che grazie alla presenza di un potenziometro posto in parallelo allo stelo del pistone idraulico, comanda una valvola idraulica proporzionale. Il regolatore è inserito all'interno di un quadro che gestisce l'accensione e lo spegnimento del compressore idraulico, collegato ad un PC tramite una scheda di acquisizione e controllo National Instruments (NI)[®]. Il moto ondoso all'interno del canale è quindi generato mediante un software appositamente messo a punto, il quale invia al battitore i riferimenti di posizione mediante la scheda NI e che sarà descritto più nel dettaglio di seguito.

Alle spalle del battitore è presente un serbatoio collegato al canale tramite un convogliatore di sezione rettangolare a 3 lati, avente lo scopo di accumulo momentaneo dei volumi d'acqua mobilitati dal battitore. Esso è riempito con materassi realizzati mediante una rete in materiale plastico riempita con spezzoni di tubo corrugato in PET, allo scopo di smorzare il moto ondoso generato alle spalle del battitore.

E' inoltre presente, una vasca di accumulo dei volumi d'acqua nel canale, la quale, mediante una pompa idraulica, alimenta un sistema di ricircolo delle portate che possono dunque essere reimmesse all'interno del canale alle spalle del battitore. All'estremità opposta del canale è stato realizzato il modello fisico oggetto della sperimentazione.

5.3 Strumentazione utilizzata

Per la misura delle altezze delle onde nel canale sono state impiegate quattro sonde di livello di tipo resistivo, di lunghezza pari a 300 mm, costituite da due fili metallici di acciaio inossidabile di diametro di 1.5 mm, disposti parallelamente ad una distanza di 12.5 mm. La presenza di acqua fra i due fili cortocircuita la sonda, la quale è alimentata da una differenza di potenziale con un segnale ad onda quadra ad alta frequenza. In uscita viene inviato un segnale di corrente proporzionale alla profondità di immersione della sonda il quale viene trasformato in un segnale di differenza di potenziale. Il segnale analogico viene inviato ad una scheda di acquisizione per essere convertito in digitale. I valori di differenze di potenziale così misurati vengono convertiti in altezza d'acqua mediante un software appositamente realizzato.

Le prove sono state documentate mediante l'uso di una fotocamera reflex ed una videocamera quest'ultima è stata utilizzata anche per indagare aspetti di morfodinamica e stabilità.

5.4 Preparazione del modello fisico

Per realizzare il modello fisico della barriera soffolta in sacchi di geotessuto si è scelto di riprodurre un modello in scala 1:50.

Innanzitutto, poiché i tiranti idrici da riprodurre nel corso della campagna sperimentale sono piuttosto piccoli, per ottimizzare il funzionamento del battitore a ventola e riuscire a riprodurre onde più “pulite”, si è reso necessario sollevare il fondo del canale nella zona che ospita il modello.



Figura 18 Vista del canale prima dell'innalzamento del fondo

Pertanto si è deciso di innalzare il fondo mediante doppio strato di mattoni pieni di asfalto, delle dimensioni di 20x10x3 cm poggiati su un bassofondo di polistirolo dello spessore di 2.5 cm (Fig.18).

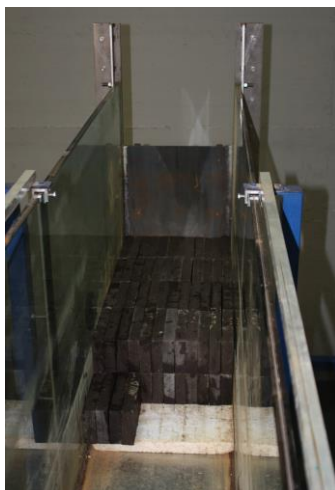


Figura 19 Innalzamento del fondo del canale

Quindi si è disposto uno strato di geotessuto ed è stato poi versato uno strato uniforme alto 10 cm di sabbia, utilizzando sabbia di quarzo uniforme avente un diametro mediano d_{50} pari a 0.25 mm (Figura 19).



Figura 20 Sabbia di quarzo impiegata per la sperimentazione condotta.

Una volta realizzato uno strato uniforme di spessore pari a 10 cm sono state posizionate due guide alle pareti del canale, poggiandole sul substrato sabbioso, allo scopo di agevolare la sagomatura del profilo di spiaggia e controllare la pendenza di quest'ultimo. Si è quindi passati a realizzare in scala il modello di sandbag: si è prima realizzato l'involucro in geotessuto, lasciando un lato aperto per le operazioni di riempimento, quindi questo è stato riempito in sabbia e infine chiuso l'ultimo lato, avendo cura di verificare che il peso di ogni "sacchetto" fosse di circa 350 g (fig.20).



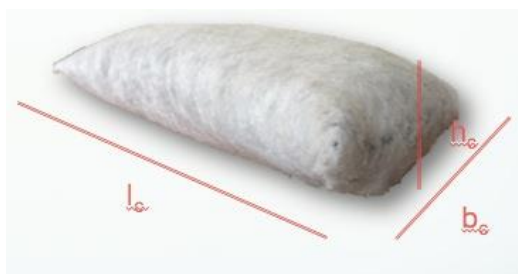
Figura 21 Sacchetto in geotessuto

Di seguito si riportano alcune foto per illustrare il modello costruito in scala 1/50 presso il laboratorio di idraulica e costruzioni idrauliche dell'Università di Messina.



Figura 22 Modello della barriera in geotessuto in scala 1:50

Per la costruzione del modello si sono utilizzati 80 sacchi di geotessuto riempiti con sabbia. Ogni sacchetto delle seguenti dimensioni:



		Prototype	Model
l_c	(m)	7.5	0.15
b_c	(m)	4	0.08
h_c	(m)	1.5	0.03

Figura 23 GSC e relative misure

5.5 Operazioni preliminari

Una volta montato il modello, prima di iniziare le prove è necessario effettuare una fase preliminare in cui vengono posizionate le sonde resistive per la misura del livello della superficie libera a una distanza di circa una lunghezza d'onda dalla struttura. La misura della distanza tra le sonde x_{12} (distanza tra la prima e la seconda sonda) e x_{13} (distanza tra la prima e la terza sonda), essenziale per l'applicazione del metodo di *Mansard e Funke (1980)*, come descritto al capitolo precedente, è effettuata in prossimità del livello medio nel canale.

Affinché il segnale delle sonde resistive possa essere trasformato in misura di livello, le sonde vengono opportunamente tarate, in modo da poter convertire il segnale, acquisito in Volt, in una misura di livello in cm attraverso l'individuazione di una retta di calibrazione. A tal fine, dal momento che i tiranti in gioco sono piuttosto bassi, la taratura è stata eseguita facendo variare il livello idrico in vasca: inizialmente questo è stato portato al livello zero, corrispondente al livello medio del mare, quindi si è riempito il canale a ± 2 cm e successivamente si è riportato il livello allo zero iniziale, registrando ad ogni step il valore in Volt registrato dalle sonde.

5.5.1 Problematiche riscontrate

L'attività di laboratorio presuppone un alto numero di tentativi e prove sul campo prima di ottenere un modello o una campagna sperimentale affidabile tale da determinare risultati coerenti e significativi.

Il modello appena descritto non si può considerare la versione definitiva con cui si sono effettuati i test, in quanto sono stati apportati dei miglioramenti dopo aver effettuato le prime prove in cui sono stati evidenziati alcuni problemi in particolare di stabilità dei sacchetti lato off-shore. Inoltre la campagna sperimentale ha riguardato l'analisi della risposta di due configurazioni diverse. La prima, che nella parte successiva della tesi chiameremo configurazione "regolare", è una configurazione progettata secondo i criteri tradizionali di una barriera tipica in geotessuto; la seconda è una configurazione, che chiameremo "random", in cui la disposizione dei sacchetti è casuale (fig.23). La sperimentazione ha riguardato un confronto dal punto di vista morfodinamico, idrodinamico e di stabilità della struttura nelle due configurazioni.



Figura 24 a) Modello configurazione “regolare” b) Modello configurazione “random”

E' stata sin da subito evidente la necessità di dover preservare la continuità costruttiva della barriera nelle vicinanze delle pareti in vetro del canale idraulico. Infatti, disponendo la seconda fila dei sacchetti sfalsati rispetto alla prima e terza fila, si è creato uno spazio di dimensioni tali da non esser trascurabile in quanto molto più grande degli interspazi del resto della barriera, in entrambi i lati della struttura, causando problemi di instabilità dello strato superiore oltre a modificare sensibilmente la permeabilità della barriera (fig.24).

Per risolvere questo problema, si è deciso di costruire dei sacchetti di pari lunghezza e spessore a quelli del resto della barriera di larghezza pari alla metà degli altri sacchetti.



Figura 25 Discontinuità della barriera in prossimità dei vetri

CAPITOLO 6

ESPERIMENTI CONDOTTI E ANALISI RISULTATI

6.1 Generalità

La campagna sperimentale si è concluso dopo aver effettuato un numero consistente di prove in laboratorio pari a 185 prove di cui 3 di lunga durata (12h) per lo studio morfodinamico del modello. Non tutte le prove hanno portato risultati significativi, anzi sono stati necessari diversi tentativi prima di ottenere un modello affidabile. In questo capitolo si riportano le procedure adottate e le analisi effettuate sui risultati ottenuti.

6.2 Procedura sperimentale adottata

La procedura sperimentale è stata organizzata in tre fasi: una fase preliminare, una fase di acquisizione dei dati e una di elaborazione degli stessi.

La fase preliminare è unica per tutte le prove relative a una medesima configurazione del modello e viene generalmente ripetuta ogni volta che il canale viene riempito. La seconda e la terza fase invece devono essere ripetute per ogni prova.

6.2.1. Operazioni preliminari

Durante la fase preliminare si posizionano le sonde resistive per la misura del livello della superficie libera a una distanza di circa due lunghezze d'onda dalla barriera.

Il canale viene quindi riempito fino alla profondità h prescelta $h=22$ cm. Il raggiungimento del livello viene controllato tramite l'uso di una punta idrometrica con una precisione pari a 1/20 di millimetro.

La misura della distanza tra le sonde, essenziale per l'applicazione del metodo di Mansard e Funke (1980), è effettuata in prossimità del livello medio nel canale.

Affinché il segnale delle sonde resistive possa essere trasformato in misura di livello, le sonde vengono opportunamente tarate, in modo da poter convertire il segnale, acquisito in Volt in una misura di livello in cm attraverso l'individuazione di una retta di calibrazione.

6.2.2. Acquisizione dei dati

Il primo passo della fase di acquisizione dati consiste nella scelta dei parametri per la generazione del moto ondoso all'interno del canale, ovvero nella scelta della condizione idrodinamica a cui sottoporre la barriera.

Come accennato in precedenza, questa fase viene perseguita attraverso l'utilizzo di un apposito software, messo a punto in ambiente Delphi®, il quale, previa inizializzazione del sistema, consente innanzitutto di selezionare se riprodurre onde regolari, random o di acquisire un segnale generato dall'esterno.

Nel caso di generazione di onde regolari, il codice richiede di fissare l'ampiezza (in Volt) che la frequenza (in s) di oscillazione del battitore, nonché l'offset e la frequenza di campionamento dei dati.

Nel caso di generazione di onde random, il codice è in grado di riprodurre uno spettro TMA, ovvero caratterizzato dalla seguente relazione:

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^4 f^{-5} \exp \left[-1.25 (T_p f)^4 \right] \exp \left[-(T_p f - 1)^2 / 2 \right]$$

in cui:

$$\beta_j = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]$$

$$T_p = T_s / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad \sigma = \begin{cases} 0.07 : f \leq f_p \\ 0.09 : f \geq f_p \end{cases}$$

$$\gamma = 3.3$$

essendo H_s e T_s l'altezza ed il periodo significativi, f ed f_p rispettivamente la frequenza e la frequenza di picco dello spettro.

Oltre alle grandezze sopra menzionate vengono impostate anche le frequenze di taglio del segnale, assunte pari a 0.05 per quanto riguarda il limite inferiore e a 2.5 per quello superiore, la frequenza di campionamento dei dati, nonché il fattore di scala, l'offset del battitore e la durata della serie temporale, assunta pari a 180 s.

La fase di registrazione del segnale delle due sonde di livello avviene simultaneamente all'innescio del moto ondoso nel canale, pertanto in fase di elaborazione dei dati è poi necessario

depurare il segnale delle prime decine di secondo, in modo tale da filtrare il transitorio iniziale e che all'interno del canale si sia già instaurato il processo di riflessione multipla.

La frequenza di acquisizione adottata è pari a 50 Hz per le prove con onde regolare e 100 Hz per gli spettri; la durata di ogni prova è pari a 2 minuti per le onde regolari (100-250 periodi d'onda circa) e 4 minuti per le onde irregolari (200-500 periodi d'onda circa).

Inoltre, per ogni prova sperimentale è stata scattata una fotografia e sono state segnalate eventuali note, al fine di individuare anche visivamente qualora intervenissero anomalie della prova stessa (eccessiva tridimensionalità dell'onda, overtopping della struttura, etc.).

6.3 Elaborazione ed analisi dei risultati

Una volta acquisiti, i dati vengono subito elaborati. Il primo passo consiste nella generazione degli spettri di energia a partire dai segnali rilevati dalle sonde, tramite un'analisi DFT (Direct Fourier Transform). Successivamente vengono calcolati gli spettri dell'onda incidente e di quella riflessa, applicando il metodo delle tre sonde di Mansard e Funke (1980) e utilizzando dei codici di calcolo in linguaggio FORTRAN appositamente implementati. La conoscenza di questi ultimi spettri di energia consente quindi di stimare sia le altezze significative delle onde incidente e riflessa, sia di stimare il valore del coefficiente di riflessione. Infine, i dati vengono registrati su supporto digitale e ne viene fatta una copia di riserva, per ragioni di sicurezza.

I parametri idrodinamici considerati per le prove sono stati ottenuti assumendo le forzanti a cui è soggetto il prototipo e riducendo secondo il rapporto 1:40 adottato per ridurre in scala il modello. Partendo da queste informazioni, le dimensioni spaziali sono state ridotte in scala 1:40, mentre i tempi sono stati ridotti in scala $(1:40)^{1/2}$.

Più specificamente, i periodi utilizzati nella modellazione sono risultati compresi tra 0.6 s e 1.5 s e le altezze d'onda tra 0.06 m e 0.003 m.

6.3.1. Prove condotte

La prima serie di test effettuata ha avuto l'obiettivo per ciascuna delle due configurazioni del modello di valutare l'altezza d'onda incidente, l'altezza d'onda riflessa e il valore del coefficiente di riflessione e di trasmissione al variare delle condizioni idrodinamiche.

Realizzato, come detto il modello, si è proceduto con le prima serie di prove.

CONFIGURAZIONE REGOLARE								
Tipo	N. prova	V	f	T	Hi	Kr	Nuove prove	foto
regolari	el_0001	0,2	0,5	2	0,01	0,55	001	398
regolari	el_0003	0,6	0,5	2	0,031	0,305	002	399
regolari	el_0010	0,8	0,75	1,3	0,058	0,262	003	400
regolari	el_0015	0,6	1	1	0,053	0,232	004	401
regolari	el_0020	0,4	1,25	0,8	0,034	0,148	005	402
regolari	el_0023	1	1,25	0,8	0,71	0,208	006	403
regolari	el_0025	0,2	1,5	0,66	0,015	0,158	007	404
regolari	el_0028	0,8	1,5	0,66	0,058	0,171	008	405
regolari	el_0032	0,4	1,75	0,574	0,022	0,296	009	406
regolari	el_0036	1,2	1,75	0,57	0,035	0,277	010	407
regolari	el_0040	0,8	2	0,51	0,025	0,27	011	408
irregolari	el_0043	0,01	1,2	1,39	0,027	0,296	012	409
irregolari	el_0046	0,01	0,6	0,88	0,005	0,2	013	410
irregolari	el_0050	0,03	0,8	1	0,024	0,292	014	411
irregolari	el_0053	0,05	1,2	1,03	0,029	0,241	015	412
irregolari	el_0058	0,07	1,2	1,15	0,039	0,256	016	413
irregolari	el_0060	0,07	0,8	1	0,063	0,266	017	414
regolari	el_062	1,2	0,6	1,48	0,064	0,338	018	415
regolari	el_063	1,4	0,6	1,55	0,072	0,202	019	416

Tabella 6-1 Prove per valutare il coefficiente di riflessione e di trasmissione al variare delle condizioni idrodinamiche

CONFIGURAZIONE Random								
Tipo	N. prova	V	f	T	Hi	Kr	Nuove prove	foto
regolari	el_0001	0,2	0,5	2	0,01	0,55	001	376
regolari	el_0003	0,6	0,5	2	0,031	0,305	002	377-378
regolari	el_0010	0,8	0,75	1,3	0,058	0,262	003	380
regolari	el_0015	0,6	1	1	0,053	0,232	004	381
regolari	el_0020	0,4	1,25	0,8	0,034	0,148	005	382
regolari	el_0023	1	1,25	0,8	0,71	0,208	006	383
regolari	el_0025	0,2	1,5	0,66	0,015	0,158	007	384
regolari	el_0028	0,8	1,5	0,66	0,058	0,171	008	385
regolari	el_0032	0,4	1,75	0,574	0,022	0,296	009	386
regolari	el_0036	1,2	1,75	0,57	0,035	0,277	010	387
regolari	el_0040	0,8	2	0,51	0,025	0,27	011	388
irregolari	el_0043	0,01	1,2	1,39	0,027	0,296	012	389
irregolari	el_0046	0,01	0,6	0,88	0,005	0,2	013	390
irregolari	el_0050	0,03	0,8	1	0,024	0,292	014	391
irregolari	el_0053	0,05	1,2	1,03	0,029	0,241	015	393
irregolari	el_0058	0,07	1,2	1,15	0,039	0,256	016	394
irregolari	el_0060	0,07	0,8	1	0,063	0,266	017	395
regolari	el_062	1,2	0,6	1,48	0,064	0,338	018	396
regolari	el_063	1,4	0,6	1,55	0,072	0,202	019	397

Tabella 6-2 Prove per valutare il coefficiente di riflessione e di trasmissione al variare delle condizioni idrodinamiche

Durante queste prove si è riscontrato un altro limite costruttivo, non notato in fase di costruzione; la cucitura di chiusura dei singoli GSC sporgendo per circa 1 cm causava il sollevamento di alcuni elementi della struttura a causa di un "effetto ala" che ne conseguiva.

E' stato necessario non considerare i risultati ottenuti, smontare la barriera ed eliminare la cucitura come mostrato in fig. 25.



Figura 26 Sacchetto senza alette di cucitura

Durante l'esecuzione di questa serie di test, si è notato un discreto movimento della sabbia all'interno degli interspazi della barriera. L'influenza che l'accumulo di questo materiale potesse avere sulla permeabilità della struttura, sulla stabilità e sull'apporto solido da largo alla spiaggia è stato spunto di ulteriori studi. In laboratorio e con gli strumenti a disposizione, non è stato semplice investigare questi aspetti. La prima idea adottata, con scarsi risultati, è stata quella di inserire dei pallini di polistirolo tra i sacchi e di valutare i loro spostamenti in un secondo momento mediante video in HD. Ai primi tentativi si è interrotta la prova in quanto è stato subito evidente che il risultato non era assolutamente significativo. Si riportano per completezza in Tab 6.2. le prove effettuate.

CONFIGURAZIONE REGOLARE Prove con polistirolo 7-12 dicembre							
Tipo	N. prova	V	f	T	Hi	Kr	foto
regolari	el_0001	0,2	0,5	2	0,01	0,55	418
regolari	el_0032	0,4	1,75	0,574	0,022	0,296	419
regolari	el_0010	0,8	0,75	1,3	0,058	0,262	420
regolari	el_0015	0,6	1	1	0,053	0,232	421
irregolari	el_0050	0,03	0,8	1	0,024	0,292	no
irregolari	el_0053	0,05	1,2	1,03	0,029	0,241	422

Tabella 6-3 Prove con polistirolo

Il polistirolo non è risultato un materiale adatto per simulare né lo spostamento dei granelli di sabbia né per simulare il moto delle particelle d'acqua. Il tentativo seppur fallimentare è stato spunto di riflessione per determinare la tecnica adeguata per simulare in modo coerente il trasporto solido in laboratorio.

Il passaggio successivo è stato quello di indagare il movimento dell'acqua negli interspazi e per farlo si è deciso di usare un inchiostro come tracciante e sempre tramite videocamera in HD si è osservato a posteriori il moto all'interno del fluido. Il tentativo è stato molto più interessante della prova con il polistirolo in quanto si è potuto avere conferma di quanto ipotizzato ad "occhio nudo" su come si muovesse l'acqua all'interno della barriera e con essa le particelle più piccole di sabbia. Anche in questo caso non è stato semplice realizzare il modello ma si è dovuto valutare come iniettare il tracciante e con quale densità, solo dopo alcuni tentativi si è ottenuta la giusta densità dell'inchiostro. Un esempio è riportato in Fig. 26.



Figura 27 Prova con tracciante

L'ago è stato posizionato in punti diversi, il tracciante ha evidenziato il classico moto ellittico delle particelle sotto la cresta dell'onda. Si è visto che l'acqua che filtra sotto i sacchetti applica una spinta verso l'alto sulla GSC, esattamente quando la cresta dell'onda passa, causando instabilità e accumulo di sabbia negli interstizi della struttura.

Un'altra serie di prove è stata condotta per analizzare il diverso comportamento dei sacchi riempiti con sabbia di granulometria diversa.

Si è scelto di ricostruire il modello con GSC riempiti con sabbia del litorale messinese ed effettuare un confronto con la barriera con cui si sono effettuati gli altri test. Tab. 6-4.

CONFIGURAZIONE REGOLARE Sabbia Messina durata prove: regolari 3min irregolari 5min					
Tipo	N. prova	V	f	T	foto
regolari	el_0001	0,2	0,5	2	783
regolari	el_0003	0,6	0,5	2	784
regolari	el_0010	0,8	0,75	1,3	785
regolari	el_0015	0,6	1	1	786
regolari	el_0020	0,4	1,25	0,8	787
regolari	el_0023	1	1,25	0,8	788
regolari	el_0025	0,2	1,5	0,66	789
regolari	el_0028	0,8	1,5	0,66	790
regolari	el_0032	0,4	1,75	0,574	791
regolari	el_0036	1,2	1,75	0,57	792
regolari	el_0040	0,8	2	0,51	
irregolari	el_0043	0,01	1,2	1,39	793
irregolari	el_0046	0,01	0,6	0,88	794
irregolari	el_0050	0,03	0,8	1	795
irregolari	el_0053	0,05	1,2	1,03	796
irregolari	el_0058	0,07	1,2	1,15	799
irregolari	el_0060	0,07	0,8	1	800
regolari	el_062	1,2	0,6	1,48	801
regolari	el_063	1,4	0,6	1,55	803

Tabella 6-4 Prove configurazione regolare con GSC riempiti con sabbia prelevata nel litorale messinese

CONFIGURAZIONE Random Sabbia Messina					
Tipo	N. prova	V	f	T	foto
regolari	el_0001	0,2	0,5	2	810
regolari	el_0003	0,6	0,5	2	811
regolari	el_0010	0,8	0,75	1,3	812
regolari	el_0015	0,6	1	1	813
regolari	el_0020	0,4	1,25	0,8	814
regolari	el_0023	1	1,25	0,8	815
regolari	el_0025	0,2	1,5	0,66	816
regolari	el_0028	0,8	1,5	0,66	817
regolari	el_0032	0,4	1,75	0,574	818
regolari	el_0036	1,2	1,75	0,57	819
regolari	el_0040	0,8	2	0,51	820
irregolari	el_0043	0,01	1,2	1,39	821
irregolari	el_0046	0,01	0,6	0,88	822
irregolari	el_0050	0,03	0,8	1	823
irregolari	el_0053	0,05	1,2	1,03	824
irregolari	el_0058	0,07	1,2	1,15	825
irregolari	el_0060	0,07	0,8	1	826
regolari	el_062	1,2	0,6	1,48	827
regolari	el_063	1,4	0,6	1,55	828

Tabella 6-0-5 Prove configurazione casuale con GSC riempiti con sabbia prelevata nel litorale messinese

Successivamente si è voluto indagare, come vedremo in seguito, la diversa stabilità dei sacchetti che costituiscono la struttura sollecitati da un treno d'onde di uguale periodo ma differenti H_s e con due diversi livelli di sommergezza.

CONFIGURAZIONE Regolare - Sabbia Messina - Prof. 22cm				
N. prova	V	f	Video	foto
001	1	0,5	primo video	833
002	1,2	0,5	secondo	834
003	0,6	0,75	terzo	835
004	0,8	0,75	quarto	836
005	0,6	1	quinto	837
006	0,8	1	sesto	838
007	0,6	1,25	settimo	839
008	0,8	1,25	ottavo	840
009	0,6	1,5	nono	841
010	0,8	1,5	decimo	842
011	0,8	1,75	undicesimo	843
012	0,2	1	dodicesimo	844
013	0,3	1	tredecimesimo	845
014	0,4	1	quattordicesimo	846
015	0,5	1	quindicesimo	847
016	0,7	1	sedicesimo	848
017	0,9	1	diesettesimo	849

Tabella 6-6 Prove configurazione regolare per valutare la stabilità dei GSC con sommergezza 22 cm

CONFIGURAZIONE Regolare - Sabbia Messina - Prof. 24cm				
N. prova	V	f	Video	foto
001	1	0,5	primo video	850
002	1,2	0,5	secondo	851
003	0,6	0,75	terzo	852
004	0,8	0,75	quarto	853
005	0,6	1	quinto	854
006	0,8	1	sesto	855
007	0,6	1,25	settimo	856
008	0,8	1,25	ottavo	857
009	0,6	1,5	nono	858
010	0,8	1,5	decimo	859
011	0,8	1,75	undicesimo	860
012	0,2	1	dodicesimo	861
013	0,3	1	tredecimesimo	862
014	0,4	1	quattordicesimo	863
015	0,5	1	quindicesimo	864
016	0,7	1	sedicesimo	865
017	0,9	1	diesettesimo	866

Tabella 6-7 Prove configurazione regolare per valutare la stabilità dei GSC con sommergezza 24 cm

6.4. Analisi risultati

L'obiettivo di questo lavoro, come detto, è di analizzare la risposta di una barriera soffolta in GSC in termini:

- Idrodinamici
- di stabilità
- Morfodinamici

Il primo aspetto studiato durante la campagna sperimentale ha riguardato l'idrodinamica. I coefficienti di riflessione e di trasmissione sia per onde regolari sia per onde irregolari sono stati analizzati per la barriera in configurazione regolare.

Il primo passo compiuto per valutare gli effetti della struttura sull'idrodinamica è stato relativo alla valutazione della riflessione causata dall'opera nei confronti dell'onda proveniente dal largo.

In figura 27 e in figura 28 sono mostrati i valori dei coefficienti di riflessione al variare del periodo dell'onda.

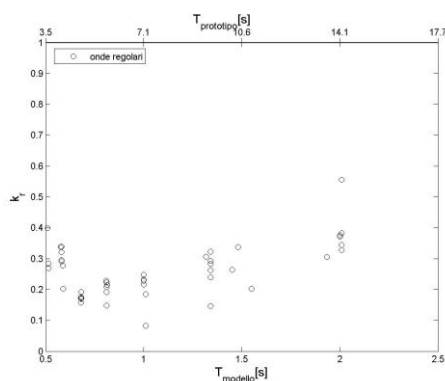


Figura 28 Coefficienti di riflessione al variare del periodo in presenza di onde regolari.

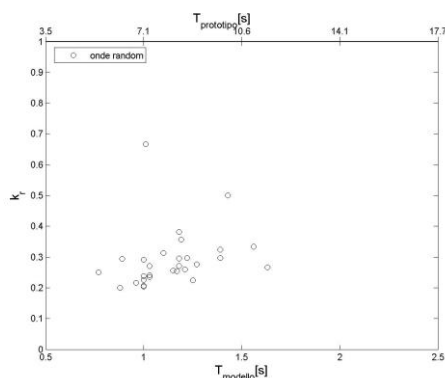


Figura 29 Coefficienti di riflessione al variare del periodo in presenza di onde irregolari.

Come è possibile osservare dai due grafici, sia in presenza di onde regolari che con onde irregolari la riflessione indotta dalla struttura lato mare è inferiore al 50%. Inoltre per periodi compresi tra 0.5 e 1 s in scala di modello il coefficiente di riflessione presenta un minimo con valori intorno a 0.2-0.3.

E' stata successivamente valutata la trasmissione del moto ondoso attraverso la barriera, rispettivamente per onde regolari ed irregolari. In entrambi i casi i coefficienti di trasmissione hanno un andamento decrescente al crescere dell'altezza d'onda incidente.

I risultati ottenuti sono stati inoltre confrontati con la formula proposta da *Van der Meer (1990)*. In figura 29 e 30 sono riportati detti confronti per onde regolari e irregolari. Nel caso di onde regolari è possibile osservare che la struttura in sacchi di geotessuto risponde meglio di quanto riportato in letteratura nella pressoché totalità dei casi analizzati; nel caso di onde random il comportamento della barriera è mediamente simile quanto riportato in letteratura, anche se va qui sottolineato come, specie per altezze d'onda più importanti, l'efficacia della barriera, come ricordato precedentemente, risulti notevolmente superiore.

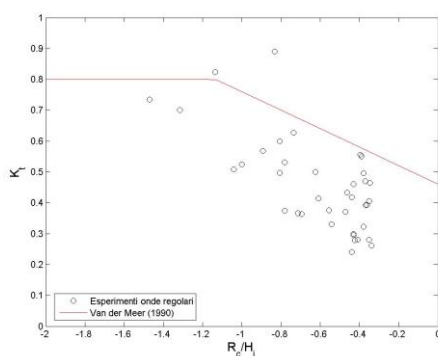


Figura 30 Confronto tra i coefficienti di trasmissione in presenza di onde regolari e la formula proposta da Van der Meer (1990).

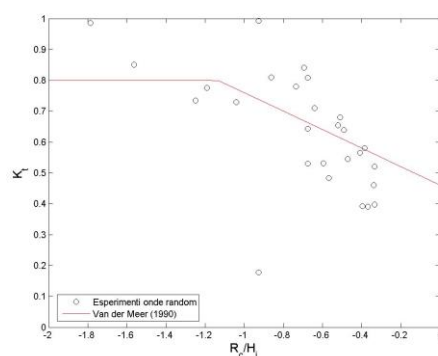


Figura 31 Confronto tra i coefficienti di trasmissione in presenza di onde irregolari e la formula proposta da Van der Meer (1990).

In Fig.31a è mostrato il coefficiente di riflessione in funzione della profondità relativa kh (k è il numero d'onda pari a $2\pi/L$ dove L è la lunghezza d'onda e h la profondità). Esso diminuisce con l'aumentare di kh attestandosi su valori di 0.2 per kh tra 1.2 e 3.

E' stata valutata anche l'energia d'onda trasmessa attraverso la barriera. I risultati sono stati rappresentati in funzione del rapporto tra la sommergezza R e l'onda incidente H_i . Il coefficiente di trasmissione decresce con l'aumentare dell'altezza d'onda incidente (Fig.31b). Le onde più

piccole passano senza risentire della presenza della barriera, la loro energia viene trasmessa interamente alla spiaggia. L'attenuazione dell'onda incidente diventa evidente per R/H più piccoli di 4 dove l'onda trasmessa è minore di circa il 40% dell'onda incidente.

Ricapitolando, le onde più piccole non risentono quasi per nulla della presenza della barriera e dunque penetrano nello specchio acqueo retrostante più o meno integralmente; l'effetto di attenuazione del moto ondoso comincia a farsi sentire per altezze d'onda dell'ordine di 3 cm in scala di modello, corrispondenti ad onde di 1.5 m in scala di prototipo, per le quali l'onda trasmessa è pari a circa il 60% di quella incidente. All'aumentare ancora dell'altezza d'onda l'efficacia della barriera è ancora più evidente, come può del resto osservarsi tenendo conto che le onde più gravose, dell'ordine di 4 m in scala di prototipo, penetrano smorzate fino al 30-40%.

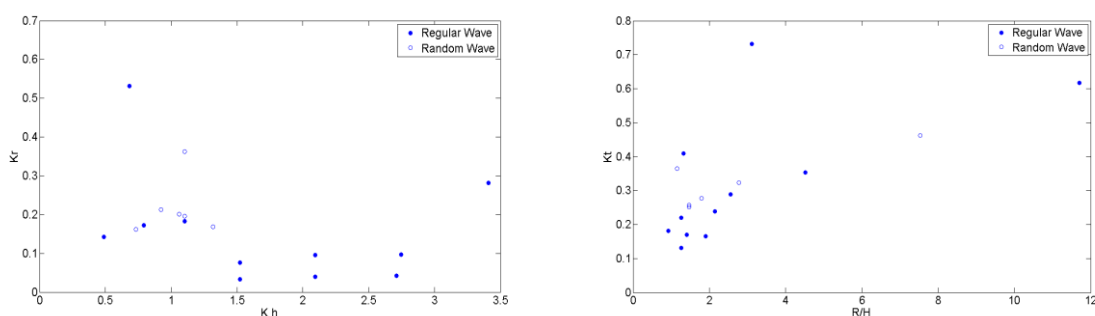


Figura 32 a) Coefficiente di riflessione

b) Coefficiente di trasmissione

Come detto nel paragrafo sulla preparazione del modello, si è pensato di confrontare una barriera costruita secondo le buone norme di progettazione rispetto ad una con i GSC disposti in modo casuale. Si è valutato il coefficiente di riflessione per entrambe le barriere (si veda fig. 32)

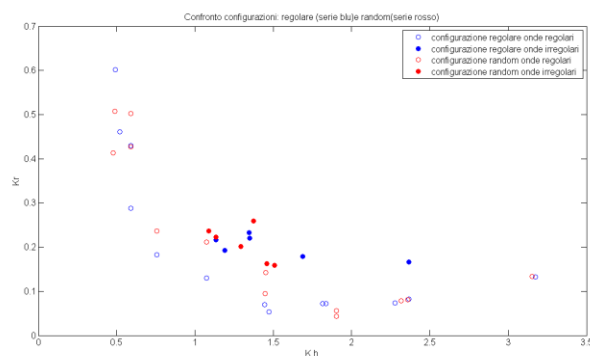


Figura 33 Confronto tra le due tipologie di barriere

Dall'analisi del grafico si nota come per le onde regolari il coefficiente di riflessione in funzione della profondità relativa è minore per la barriera costruita a regola d'arte rispetto alla configurazione random nell'intervallo di kh tra 0.7 ed 1.8 in cui K_r è circa 0.1 contro 0.15 della barriera random.

Nel caso di onde irregolari invece l'andamento è quasi identico nelle due configurazioni.

Si è valutato anche il coefficiente di riflessione per la barriera costruita a regola d'arte ma con i GSC riempiti di sabbia di diversa granulometria ovvero il modello di partenza con $d_{50}=0.25\text{mm}$ con un modello costruito sempre a regola d'arte riempito con sabbia prelevata dal litorale messinese di granulometria maggiore. I risultati sono mostrati in fig. 33 in cui si evince come il riempimento diverso, almeno in questa campagna sperimentale, non abbia comportato grosse differenze in termini di riflessione.

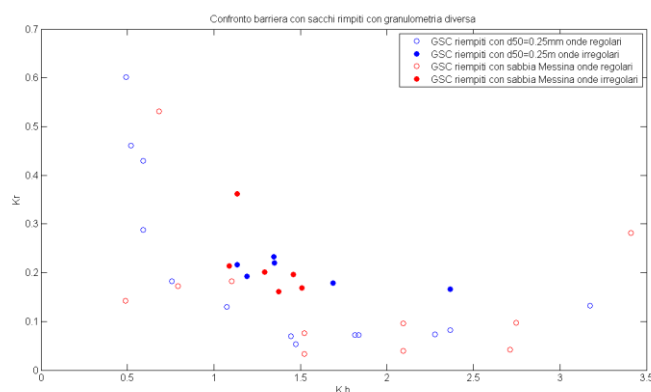


Figura 34 Confronto tra barriere costituite da GSC riempiti con granulometrie differenti

Durante l'esecuzione di questi test si è osservato che per H_i maggiori si è innescato un movimento di sollevamento della terza fila di sacchi (anche dopo aver risolto il problema dell'aletta). Per studiare questo fenomeno si sono effettuati degli esperimenti mantenendo il periodo d'onda costante e variando l'altezza d'onda fino a determinare il sollevamento dei sacchi. Questa procedura è stata fatta per due profondità diverse $h=22\text{ cm}$ e $h=24\text{ cm}$. I risultati sono mostrati in Fig.26 dove l'ampiezza incidente A_i , resa adimensionale in funzione della profondità, è stata rappresentata in funzione del periodo adimensionale $T/(gL)^{0.5}$. Nel grafico si sono distinti i sacchetti instabilizzati da quelli stabili. Si è ricavata una curva che separa chiaramente le condizioni di stabilità da quelle di instabilità:

$$Ai/h = 0.0001 / (T/(gL)^{0.5} - 0.28) + 0.068; [1]$$

Nella zona sotto la curva si ha l'area di instabilità mentre sopra di essa quella di stabilità. In questa zona i sacchetti non si muovono e la stabilità della barriera non viene compromessa.

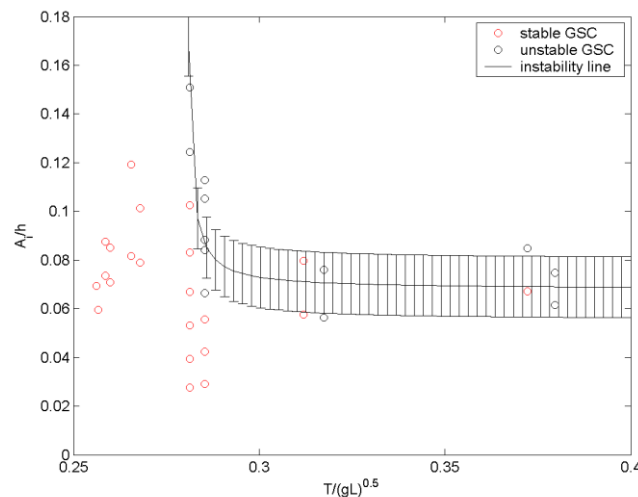


Figura 35 Curva di instabilità dei GSC in funzione delle caratteristiche idrodinamiche

Nell'esecuzione della campagna di prove si è anche notata la formazione di uno scavo al piede della struttura.



Figura 36 scavo al piede

Sono stati quindi montati dei pannelli lucidi sui vetri del canale idraulico in cui è stato riportato il profilo della struttura e della spiaggia e del fondo (si veda Fig. 36).

Preparato il modello sono state effettuate alcune prove di durata pari a 12h. Si consideri che una prova di durata pari a 12h, corrisponde ad una mareggiata di circa 85 ore a scala di prototipo.

Sono stati eseguiti tre test, il primo con onde regolari con $H_i = 3,6$ cm e $T = 1$ s, il secondo con onde irregolari con $H_i = 1.8$ m e $T = 1$ s, ed il terzo con onde regolari con $H_i = 4.6$ cm e $T = 1$ s, denominati rispettivamente test001, test002 e test003. I profili di spiaggia e del fondale sono stati tracciati per tutti e tre i test dopo 30 min, 60 min, 90min, 120 min, 180 min, 240 min, 300 min, 420 min, 540 min, 720 min dall'inizio della prova.

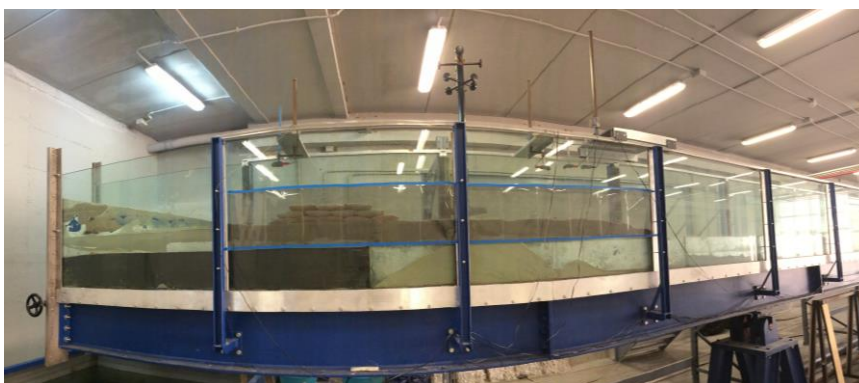


Figura 37 Lucidi

Il terzo test è stato costruito ad hoc per analizzare l'interazione barriera-sabbia e valutare la diversa risposta della sabbia in funzione della distanza dalla barriera. Di seguito una breve sintesi della costruzione del modello a cui è stato sottoposto il terzo test. E' stata colorata parte della sabbia di quattro colori differenti (Fig. 37).



Figura 38 Preparazione sabbia colorata

In quest'ultima prova è stato asportato uno strato di circa 3 cm di sabbia e sono stati disposti i quattro strati di sabbia colorata di larghezza pari a circa 5 cm (corrispondenti a circa 20 m reali). Le fasi di costruzione sono riportate in Fig. 38 dove si vede che è stata utilizzata una piastra per separare i differenti colori di sabbia durante la stesa.



Figura 39 Installazione dei 4 strati di sabbia colorata

Nel test001 (figura 39 a) inizialmente il materiale viene trasportato verso il battitore e si crea lo scavo al piede della barriera ($t = 0-90\text{min}$), dopo questa fase la sabbia si accumula negli interspazi della barriera ($t = 90-420\text{ min}$), e raggiunge il valore massimo di scavo alla fine del test, cioè dopo 12 ore. Nel caso del test002 con onde random (Figura 39 b), lo scavo raggiunge il suo valore massimo a 540 minuti e poi rimane sostanzialmente costante fino al termine della prova. In questo caso è anche visibile che la sabbia raggiunge un profilo di equilibrio che viene mantenuto fino alla fine della prova. Lo scavo, ovviamente, provoca gravi problemi di instabilità della struttura. Nel caso delle onde irregolari il fenomeno avviene dall'inizio della prova (30 min.) (Figura 39 b). In test003 è stata effettuata sempre la stessa misura (Figura 39 c). Durante la prova inizialmente il materiale si accumula nei pressi della barriera ($t = 0-180\text{ min}$), dopo di che viene trasportato dal lato del battitore e crea lo scavo al piede della barriera. Il valore massimo dello scavo si misura al termine del test, cioè dopo 12 ore. In entrambi i casi di onde regolari test001 test003 lo scavo al piede si verifica dopo un tempo più lungo, ma è più evidente (figura 39 a) e c)).

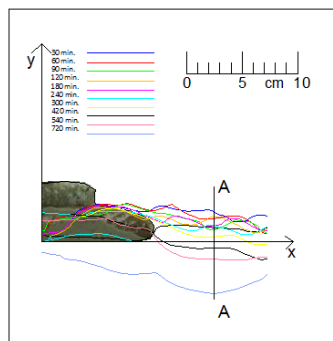
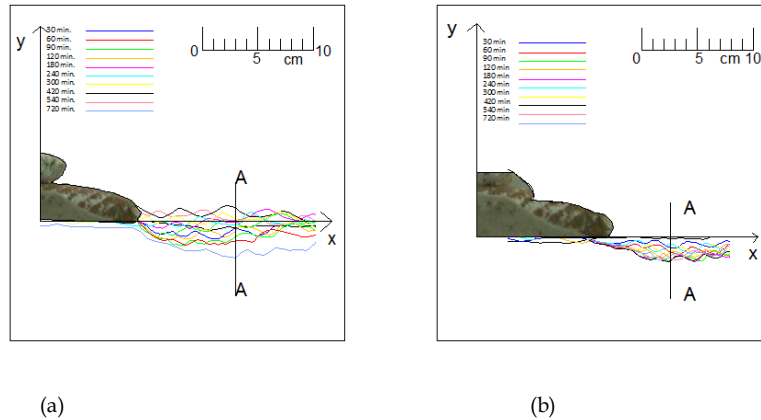


Figura 40 Profilo di spiagge a tergo della struttura: a) Onde regolari $H_s = 3.6$ cm b) Onde irregolari $H_s = 1.8$ cm c) Onde regolari $H_s = 4.6$ cm.

Si è riportato il valore dello scavo al piede adimensionale per le tre prove, dove si evince quanto spiegato precedentemente. La prova con onde irregolari determina un profilo di equilibrio che è evidente nel grafico. (Fig. 40)

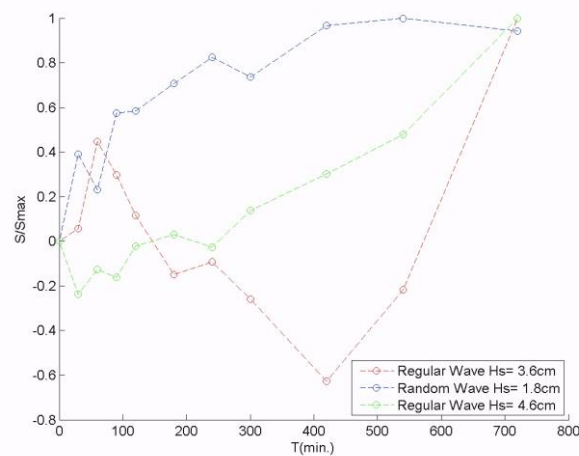


Figura 41 Scavo al piede misurato nelle tre prove

Il test003 con sabbia colorata mostra chiaramente il processo di trasporto dei sedimenti. Dopo le prime tre ore è maggiore la quantità di sedimenti trasportata verso l'interno della barriera rispetto a quella trasportata verso il largo. Dopo 180 minuti, la sabbia rossa e la sabbia blu hanno coperto lo strato di sabbia gialla e si stanno accumulando internamente alla barriera (Fig. 41). La sabbia verde che era la più distante dalla barriera vedi Fig. 31 viene trasportata in maggior parte verso il battitore e in minima parte si accumula insieme agli altri colori all'interno della struttura. Questo potrebbe esser dovuto alla componente d'onda riflessa dalla barriera verso largo. La prima fila di sacchi in geotessuto è completamente coperta e la seconda parzialmente. La risposta della barriera al moto ondoso potrebbe esser diversa rispetto alle condizioni di progetto, in quanto è cambiata la pendenza del fondo e di conseguenza il frangimento dell'onda potrebbe avvenire in anticipo. Inoltre è variata completamente la permeabilità della barriera che adesso possiede gli interspazi completamente occupati dalla sabbia.



Figura 42 Momento in cui la sabbia rossa e blu sormontano lo strato giallo $t=180$ min

Dopo le prime tre ore, la sabbia gialla che prima era completamente ricoperta dalla blu e rossa, adesso è nuovamente visibile (Fig. 42) in quanto il materiale che si era accumulato ora è dentro la barriera ed in piccola parte si è accumulato lato spiaggia (Fig. 43a). Questo è un chiaro effetto positivo in riguardo all'erosione costiera.



Figura 43 Il modello a $t=300$ min



Figura 44 a) Piccolo accumulo lato spiaggia b) Materiale lato battitore

Dall'istante $t=500\text{min.}$ fino alla fine del test ($t = 720\text{min.}$), si è notato un altro aspetto interessante, il gruppo di sabbia colorata, che ora comprende tutti e quattro colori, è stato trasportato sul lato off-shore, eliminando completamente la sabbia che all'inizio aveva ricoperto le prime due file, creando una forte azione di scavo al piede della struttura. (Fig.44) Questo effetto ha causato una grave instabilità della struttura.



Figura 45 Scavo al piede al termine della prova $t=720\text{ min.}$

Al termine della prova, la barriera è stata smontata per valutare gli effetti del trasporto solido al suo interno. Si è riscontrato un notevole quantitativo di sedimenti al suo interno (fig.45) che chiaramente influenza il coefficiente di riflessione e trasmissione.



Figura 46 Sabbia interna alla barriera

L'analisi dei profili delle tre prove ha mostrato che la barriera modifica l'onda (in particolare il punto di frangimento) e influenza conseguentemente il trasporto di sedimenti sul fondo. La spiaggia ottiene dei benefici dalla presenza della barriera, perché durante i test non c'è stato alcun segno di erosione ma piuttosto il deposito di sabbia seppur di piccoli quantitativi. Il lato

off-shore della barriera mostra alcuni problemi di instabilità, come detto. Le onde regolari delle prove test001 test003 provocano un forte scavo al piede della barriera e anche il fondo sabbioso non sembra raggiungere un equilibrio. Ciò causa il movimento continuo di materiale e questo influenza anche il moto ondoso. Nel caso della prova test002 con onde irregolari il fondo sabbioso raggiunge un profilo di equilibrio. Questo è un vantaggio per la stabilità della barriera perché limita l'escavazione in corrispondenza della punta e del trasporto solido offshore.

La campagna sperimentale si è conclusa dopo aver effettuato un numero consistente di prove in laboratorio pari a 185 prove di cui 3 di lunga durata (12h) per lo studio morfodinamico del modello. Non tutte le prove hanno portato risultati significativi, anzi sono stati necessari diversi tentativi prima di ottenere un modello affidabile.

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI

7.1 Conclusioni

La campagna sperimentale oggetto di questa tesi ha riguardato l'analisi di un innovativo tipo di barriere soffolte; le barriere in geotessuto. Le indagini sono state condotte in scala 1:50 nella canaletta del laboratorio di Idraulica dell'Università di Messina grazie alla collaborazione della Prof.ssa Carla Faraci. Il modello, come abbiamo visto, è stato analizzato da diversi punti di vista. E' stato costruito su fondo mobile sabbioso, considerando due schemi realizzativi della barriera, variandone la disposizione dei sacchi, la granulometria della sabbia di riempimento e diversi stati di mare. In particolare, la barriera è stata realizzata disponendo i sacchi in modo ordinato o alla rinfusa; per lo schema ordinato (cioè con i sacchi disposti tutti longitudinalmente al canale e accuratamente assestati) sono stati considerati diversi riempimenti di sabbia. Per ciascuna prova (relativa a una combinazione di schema e stato di mare), sono stati investigati: 1) l'idrodinamica prodotta dall'interferenza della barriera con il moto ondoso; 2) la stabilità dell'opera; 3) la morfodinamica del fondo a monte della barriera (lato off-shore). Sono stati inoltre determinati i parametri utili a valutare l'efficacia dell'opera ai fini della protezione delle coste (coefficienti di riflessione e di trasmissione) e sono state riconosciute le zone di escavazione e di deposito a monte e a valle della barriera, studiando l'evoluzione spazio-temporale della morfodinamica del fondo con prove lunghe fino a 12 h, corrispondenti a circa 85 h a scala di prototipo.

Il confronto tra le due disposizioni dei sacchi (ordinata e alla rinfusa) ha evidenziato che, per le onde regolari, il coefficiente di riflessione è minore per la disposizione ordinata; invece, per le onde irregolari, che sono quelle che si attuano nella pratica, i coefficienti di riflessione risultano molto prossimi fra loro, ciò indicando che, nei riguardi delle onde di vento, non vi è vantaggio a preferire una delle due disposizioni. Il coefficiente di riflessione si mantiene in un range tra 0.5 e 0.2 che testimonia il corretto funzionamento della barriera, confermato dallo studio della trasmissione del moto ondoso. Il calcolo del coefficiente di trasmissione ha evidenziato infatti che le onde più piccole non risentono quasi per nulla della presenza della barriera e dunque penetrano nello specchio d'acqua retrostante più o meno integralmente; l'effetto di attenuazione del moto ondoso comincia a farsi sentire per altezze d'onda dell'ordine di 3 cm in scala di modello, corrispondenti ad onde di 1.5 m in scala di prototipo, per le quali l'onda trasmessa è

pari a circa il 60% di quella incidente. All'aumentare ancora dell'altezza d'onda l'efficacia della barriera è ancora più evidente, come può del resto osservarsi tenendo conto che le onde più gravose, dell'ordine di 4 m in scala di prototipo, penetrano smorzate fino al 30-40%.

La stabilità della barriera è stata studiata variando l'altezza d'onda per ogni periodo prescelto, potendo così riconoscere quali condizioni di moto ondoso e di sommergenza determinino problemi di instabilità. Ciò è stato importante per valutare il corretto funzionamento della struttura, che ha mostrato problemi di instabilità di alcuni sacchi solo in condizioni di forti mareggiate.

In definitiva, l'indagine ha portato ad evidenziare come la barriera costruita secondo lo schema ordinato raggiunga ottimi risultati in termini di riflessione e trasmissione sia se sollecitata da un treno d'onde regolari sia nel caso di onde irregolari. Questo è un primo risultato importante in quanto chiaramente la spiaggia protetta sarà protetta da eventuali problemi erosivi della linea di costa, i risultati meno incoraggianti della barriera con sacchetti disposti casualmente evidenziano l'importanza di una messa in opera della barriera ad opera d'arte. Sono state altresì condotte alcune prove di 12h ore, corrispondenti ad una mareggiata di circa 85 ore a scala di prototipo; si è osservata la formazione di uno scavo al piede tale da compromettere la stabilità della struttura per le onde regolari; tale fenomeno non si è riscontrato nel caso di onde irregolari. L'attività di ricerca svolta in definitiva mostra la buona efficacia di queste barriere che hanno il grosso vantaggio di coniugare ottimi risultati in termini di risposta idrodinamica di impatto ambientale e vantaggi economici rispetto ad altre tipologie più invasive.

RINGRAZIAMENTI

Il dottorato di ricerca ha rappresentato un'importante occasione di crescita personale e professionale, la collaborazione dei tutor Prof. Ferreri e Prof.ssa Faraci è stata fondamentale hanno rappresentato per me un'importante guida durante l'attività di ricerca e mi hanno permesso di vivere esperienze importanti formative, come i tre mesi trascorsi presso l'University College of London in cui ho potuto migliorare la mia conoscenza scientifica e della lingua inglese entrando in contatto con un ambiente internazionale molto stimolante.

Bibliografia

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici - "Atlante delle opere di ingegneria costiera" Manuali e Linee guida 44/2007

Aminti P.L., Cammelli C., Cappietti L., Jackson N.L., Nordstrom K.F., Pranzini E. 2004 "Evaluation of beach response to submerged groin construction at Marina di Ronchi, Italy, using field data and a numerical simulation model." Journal of Coastal Research, Special Issue No. 33, pp . 99-120.

Cappietti, L., Clementi E., Aminti P.L. and A. Lamberti - Piling-up and filtration at low crested breakwaters of different permeability - Proc. of the 30th International Conference on Coastal Engineering, 2006.

C.E.R.C. Coastal Engineering Research Center - Coastal and Hydraulic Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual, 1998.

Cipriani M., Mancinelli A., Vitale A. 1984 – "Strutture in elementi prefabbricati per la difesa delle spiagge: risultati sperimentali conseguiti con l'impiego della barriera frangiflutti nell'arenile di Porto Recanati (MC) e considerazioni sul dimensionamento di tali strutture." XIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Pavia

EurOTop2007 Manual – Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment, August 2007.

Goda, Y., Suzuki, Y., (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. Proc. 15th Int. Coastal Engineering Conference (ASCE), 828-845.

W.P. Hornsey a, *, J.T. Carley b, I.R. Coghlan b, R.J. Cox, 2011 “Geotextile sand container shoreline protection systems: Design and application” *Geotextiles and Geomembranes*, 425-439

Isaacson, M., (1991). Measurement of regular wave reflection. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 117, pp. 553-569.

http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/tematiche2011/05_%20Mare_e_ambiente_costiero_2011.pdf

Leopoldo F. - Dispense del corso di Ingegneria Costiera – Università degli studi Roma 3.

Mansard, E. P. D., Funke, E. R., (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. *Proc. 17th Int. Coastal Engineering Conference*, 1, pp. 154-172.

Oumeraci H., Recio, J. 2009 “Geotextile sand containers for shore protection. Ch. 21, *Handbook of coastal and ocean Engineering.*” Ed. Y.C. Kim. World scientific.

S.J. Restall, L.A. Jacksonb, Georg Heertenc, W.P. Hornseya, 2002, “Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers: an Australian perspective” *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 20, Issue 5, Pages 321–342

Ruggiero C., Auterio M. 1965, “Frangiflutto in cemento armato per difesa e ripascimento di spiagge sottili in erosione.” *IX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Trieste.

Thorton, E. B., Calhoun, R. J., (1972). “Spectral resolution of breakwater reflected waves”. *Proc. ASCE 98 (WW4)*, pp. 443-460.

Van der Meer, J.W. (1990b) Low-crested and reef breakwaters. *Delft Hydraulics*. Report no. H986II, prepared for CUR C67.

Vidal, c., Losada, M.A., Medina, R., Mansard, E.P.D. and Gomez-Pina, G.,(1992,), "An universal analysis for the stability of both low-crested and submerged breakwaters", 23rd Coastal Engineering, Venice.